



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

CHYTRÁ LOŽISKA

SMART BEARINGS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JAROSLAV JUNEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. MARTIN HARTL, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student: **Jaroslav Junek**
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: Mechatronika
Vedoucí práce: **prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.**
Akademický rok: 2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Chytrá ložiska

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Ložiska jsou klíčovou součástí každého stroje. Jejich selhání je jednou z nejčastějších příčin poruch pracovních strojů, jehož následkem mohou být vysoké finanční ztráty. Chytrá ložiska, které jsou schopny samy v reálném čase monitorovat své provozní podmínky a na jejich základě vyhodnocovat svůj vlastní stav přinesou zvýšení spolehlivosti strojů.

Typ práce: rešeršně syntetická

Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem je zpracování přehledu současného stavu poznání v oblasti chytrých valivých ložisek. Jedná se zejména o způsoby monitorování provozních podmínek (zatížení, rychlost a smysl otáčení, teplotu, vibrace, kontaminaci maziva ad.), zpracování naměřených údajů a přenos dat.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- popsat koncepci chytrého ložiska jako kyberneticko-fyzikálního systému,
- podat přehled konceptů chytrých valivých ložisek,
- zhodnotit možnosti využití chytrých ložisek u strojů v blízké budoucnosti.

Požadované výstupy: průvodní zpráva.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 - 20 stran textu bez obrázků).

ozsah práce: cca 27 000 znaků (15 - 20 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<http://ustavkonstruovani.cz/texty/bakalarske-studium-ukonceni/>

Seznam doporučené literatury:

SKF Insight™. SKF [online]. SKF Group Headquarters [cit. 2018-10-26]. Dostupné z:
<http://www.skf.com/cz/products/condition-monitoring/skfinsight.html>

VarioSense Bearings. Schaeffler Deutschland [online]. Schaeffler Technologies AG & Co. [cit. 2018-10-26]. Dostupné z:
https://www.schaeffler.de/content.schaeffler.de/en/products-and-solutions/industrial/product-portfolio/mechatronics/fag_variosense_bearing/index.jsp?en/variosense

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20.

V Brně, dne 22. 11. 2019

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Tato práce se zabývá problematikou chytrého ložiska, které bude možné využívat pro zpřesnění a předpověď stavu ložiska. Ke své realizaci využívá kyber-fyzického systému jako vhodný aparát pro průmyslové využití. Jsou zde zmíněné jednotlivé vazby a souvislosti v rámci tohoto systému. Dále je zde uveden souhrnný přehled komerčně nabízených chytrých ložisek. Ten je doplněn o patentová řešení a vědecké studie, jež by mohly poukázat na budoucí vývoj v této oblasti.

Summary

This thesis deals with the issue of smart bearing, which can be used to refine and determine the condition of the bearing. Due to its advantageous availability of the cyber-physical system as a suitable apparatus for industrial use. The links and connections within this system are mentioned here. The following is a summary of commercially available smart bearings. It is complemented by patent solutions and scientific studies, which could point to future developments in this area.

Klíčová slova

chytré ložisko, inteligentní ložisko, kyber-fyzický systém, monitorování stavu ložiska, prediktivní údržba

Keywords

smart bearing, intelligent bearing, cyber-physical system, bearing condition monitoring, smart predictive maintenance

Bibliografická citace

JUNEK, J. *Chytrá ložiska*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2020. 51 s. Vedoucí prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a pod odborným vedením prof. Ing. Martina Hartla, Ph.D.

26. června 2020

.....
Jaroslav Junek

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu práce prof. Ing. Martinu Hartlovi, Ph.D. za odborné vedení a cenné rady při tvorbě této bakalářské práce.

Obsah

1	Úvod	2
2	Analýza problému a cíl práce	4
2.1	Analýza problému	4
2.2	Cíl práce	4
3	Přehled současného stavu poznání	5
3.1	Kyber-fyzický systém	5
3.1.1	Definice	6
3.1.2	5C architektura	6
3.1.3	Technologie pro realizaci CPS	8
3.1.4	Nový pohled na architekturu CPS	10
3.1.5	Komunikační technologie	11
3.2	Virtuální dvojčata	12
3.3	Aplikace 5C architektury v rámci inteligentní továrny	12
3.4	Komerční řešení chytrých ložisek	13
3.4.1	Shaeffler Smart EcoSystem	14
3.4.2	SKF Insight	20
3.4.3	NTN	25
3.5	Souhrnný přehled inteligentních ložisek	27
3.6	Firmy a jejich patentová řešení chytrých ložisek	29
3.6.1	Timken	29
3.6.2	NSK	29
3.6.3	SKF	30
3.6.4	Koyo	32
3.7	Vědecké studie	33
3.7.1	Inkrementální snímač pohybu	33
3.7.2	Bezkontaktní monitorování teploty kuličkových ložisek	35
3.7.3	Detekce vad valivých členů pomocí vibrací	36
4	Diskuze	38
5	Závěr	41
6	Seznam použitých zdrojů	42
7	Seznam použitých zkratk a symbolů	48
8	Seznam obrázků a grafů	50
9	Seznam tabulek	51

1. Úvod

Ložiska, ať už se jedná o kluzná či valivá, se nachází téměř v každém zařízení umožňující pohyb. Většinou patří mezi kritické části stroje, protože při jejich poruše může dojít k fatálním následkům. Z pohledu konstrukce ložiska nedošlo v posledních dekádách k zásadním změnám. Samozřejmě došlo k jistému pokroku, nicméně se jedná o dílčí drobná vylepšení, jako jsou nové materiály ložiska (keramika) či maziva (založené na grafenu) [1].

Mezi běžné poruchy ložisek patří pitting, brineling, spalling, poškození klece atd. Některé z těchto poruch lze zjistit např. na základě akustické emise. Nicméně, aby k těmto poruchám nedocházelo, je nutné dodržovat provozní podmínky stanovené výrobcem a ložisko po určité době servisovat, případně vyměnit za nové.

Výměna ložisek je značně nákladná z toho důvodu, že musí dojít k rozebrání celého stroje a z toho vyplývající zastavení linky. Proto by bylo užitečné detekovat aktuální stav ložiska bez nutnosti jeho fyzické kontroly. Proto výrobci ložisek přišli s konceptem chytrého ložiska, které využívá nové technologie, jako je internet věcí, Cloudové řešení či kyber-fyzický systém (CPS), jehož součástí je prediktivní údržba (PdM) umožňující monitorování aktuálního stavu zařízení či predikce jeho poškození. Ložiska lze označit jako „chytrá“ nikoliv kvůli možnosti sběru dat, ale díky jejich následnému analytickému vyhodnocení, z kterého je patrný jeho stav – to přináší právě kyber-fyzický systém.

Prvními pokusy o zavedení inteligentního ložiska se odehrály na přelomu 80. a 90. let, kdy výrobci automobilů přišli se systémem blokování kol ABS. Nicméně se nejednalo o implementaci senzorů přímo v ložisku, nýbrž byly umístěné do jeho těsné blízkosti. Postupem času přicházeli někteří výrobci ložisek s integrací dalších senzorů pro měření více fyzikálních veličin než jen úhlové rychlosti. Tyto změny byly možné pouze u velkých ložisek, v kterých byl dostatečný prostor pro přidání těchto entit např. u těžkých stavebních strojů.

V další fázi vývoje chytrých ložisek se umístily akcelerometry a senzory teploty na ložiskové příruby, což vede k celkovému zvětšení, kvůli kterému je možné použít pouze v omezené míře. Proto se výrobci dali cestou integrace senzorů přímo do ložiska, případně k němu přidružili přídatný senzorický modul, který se k němu snadno připevní. Díky tomu je ložisko více kompaktní a lze ho snadněji umístit i do útrob stroje.

V současné době stále narážíme na problematiku přípojného kabelu, který slouží k napájení a přenosu dat. Proto se usiluje o vytvoření takového inteligentního ložiska, které bude schopno detekovat nejen svůj vnitřní stav (teplotu, vibrace atd.), ale bude také schopno provozu bez přívodního kabelu. Nutností je také bezdrátová komunikace a zapojení do internetu věcí.

Jako prevence pro snížení počtu poruch se do budoucna předpokládá, že každý stroj bude vybaven mnoha senzory, na jejichž základě bude možné přesněji určit aktuální stav stroje. Mezi senzory poskytujícími důležité informace jistě hrají svou úlohu i inteligentní ložiska.

V případech vážnějších důsledků při poruše ložiska se mohou ztráty vyšplhat do takové výše, že i pořízení inteligentního ložiska se v tomto důsledku vyplatí. V závislosti na konfiguraci se cena za jedno ložisko pohybuje kolem 1000-2000 €. Firma SKF v dnešní době monitoruje okolo jednoho milionu ložisek v reálných zařízeních. Data z nich jsou posílána do Cloudu a následně dochází k analytickým výpočtům, na základě kterých je možné detekovat aktuální stav, případně předpovědět jeho budoucí vývoj. Díky tomu je možné

provést včasný odborný zásah a tím prodloužit životnost zařízení. Dá se předpokládat, že s postupným přechodem výrobních závodů na Industry 4.0 dojde k rapidnímu nárůstu využití chytrých ložisek.

Do budoucna se také počítá s tím, že veškeré entity stroje spolu budou propojeny a na základě aktuálního stavu komponent bude docházet k samonakonfigurování stroje. Pokud by například došlo k nadměrnému zatížení ložiska, nejen že bude upozorněna obsluha na vzniklý problém, ale dojde i k automatickému navýšení mazacího filmu, snížení otáček, či k úplnému zastavení stroje. Tudíž nebude vždy nutný zásah člověk a tím se zvýší celková spolehlivost stroje.



Obr. 1.1 Inteligentní ložisko [2].

2. Analýza problému a cíl práce

2.1. Analýza problému

Ložisko je součást využívaná téměř ve všech aplikacích umožňujících pohyb. V případě jeho poruchy může dojít k poškození celého stroje a tím velkým finančním ztrátám. V minulosti bylo velice problematické některé stavy ložiska monitorovat, případně to z technických důvodů nebylo vůbec možné. S využitím moderních technologií, jako je MEMS, IoT, CPS, analýza Big data či strojového učení, dochází k vytváření systémů, jež jsou schopny tyto stavy nejen detekovat a vyhodnocovat, ale také predikovat jejich budoucí průběh. Do této oblasti spadá také inteligentní ložisko, jehož úkolem je monitorování svého aktuálního stavu případně predikce poruch dříve, než-li k nim dojde.

Chytré ložisko se fyzicky skládá z běžného ložiska doplněného o senzorickou část. Je však nutné zmínit, že onu „chytrost“ ložiska vytváří právě systém CPS, jež je schopný zpracovávat a vyhodnocovat data.

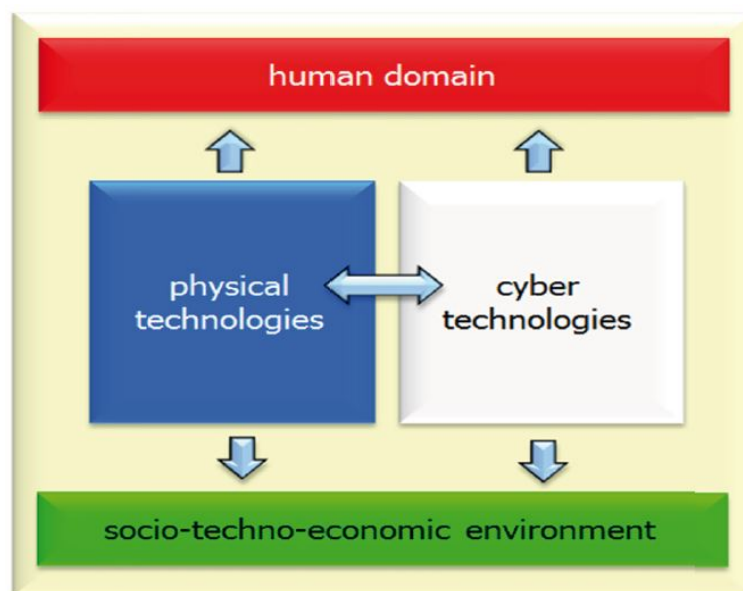
2.2. Cíl práce

Cílem této práce je podání uceleného přehledu v oblasti chytrých valivých ložisek. Lze uvést příklady jak z oblasti komerční sféry, které budou doplněny patentovými spisy, tak z vědeckých studií. Je třeba popsat chytré ložisko z pohledu kyber-fyzického systému a generalizovat jeho budoucí využití.

3. Přehled současného stavu poznání

3.1. Kyber-fyzický systém

Výraz kyber-fyzický systém (CPS) byl poprvé použit okolo roku 2006 v USA. Smyslem používání CPS je snaha o zefektivnění, samostatnost, funkčnost, bezpečnost a spolehlivost vyvíjených systémů [3]. Tato problematika se dotýká širokého spektra oborů, jako jsou zdravotnictví, energetika, výroba atd. Vhodné je také zmínit některé z důležitých vlastností CPS. Z důvodu práce v reálném čase je vhodné, aby byly schopné pružně reagovat na dynamické změny. Mají také schopnost autonomního chování, učení a vyvozovat závěry ze svých předešlých zkušeností. To je možné například díky agentním systémům, které jsou popsány v kapitole 3.1.3. Důležitá je také otevřenost systému z důvodu implementace CPS od různých výrobců a možnost sdružovat je v celky – např. továrna, která sdružuje jednotlivé stroje (dílní CPS), navenek působí z globálního hlediska jako jediné CPS. Tato otevřenost však přináší i řadu problémů, jako je konektivita, bezpečnost atd. Kyber-fyzický systém můžeme charakterizovat pomocí fyzické, kybernetické části a rozhraní (viz obr. 3.1.3).



Obr. 3.1 Struktura CPS [4].

Rozhraní zajišťuje komunikaci po síti, případně propojení mezi senzory atd. Fyzická část se zabývá fyzikálními jevy, které chceme monitorovat nebo ovlivňovat. Kybernetická část je zaměřena na výpočetní operace a zpracování informací [5]. U těchto systémů dochází k propojení mechanických, elektronických, softwarových a kybernetických komponent. Tyto komponenty propojují virtuální svět s fyzickým a jsou schopny vzájemné interakce. U CPS je dobrý předpoklad, že se v rámci průmyslu do budoucna stanou stavebními pilíři takzvaných „inteligentních továren“. Senzory, stroje a další subsystémy budou spolu propojeny, díky čemu budou schopné samočinné komunikace a předávání dat mezi sebou. Tímto způsobem spolu propojené CPS budou schopny analyzovat data, na základě kterých je v reálném čase možná detekce poruch, optimalizace sebe sama, případně optimalizace jiných CPS. [6] [7]

3.1.1. Definice

Ačkoliv CPS bylo již známo v 70. letech s příchodem mikroprocesorů, do povědomí veřejnosti se začala dostávat díky Helleni Gillovi a jeho iniciativě, kterou projevil v roce 2006 ve Spojených státech amerických [8]. Nicméně v různých publikacích se můžeme setkat i s poněkud zavádějícím označením – např. v Evropě se můžeme setkat s označením IoT (Internet věcí, který s danou problematikou souvisí, ale zahrnuje i jiné aspekty) nebo kooperativní adaptivní systémy. Dalšími označeními pro CPS jsou hluboce vestavěné systémy, hybridní automaty, sítě řízené senzory atd. Jednotlivé názvy jsou odvozeny od aspektu, na který je kladen důraz (např. funkčnost) [9]. Kyber-fyzikální systém byl charakterizován jako propojení mezi reálným a virtuálním světem. Existuje mnoho definic, jak jej popsat. Gill definuje CPS jako „fyzické, biologické a inženýrské systémy, jejichž operace jsou integrovány, monitorovány anebo řízeny výpočetním jádrem. Komponenty jsou propojeny v každém měřítku. Výpočetní technika je hluboce zakomponována do každé fyzické komponenty, případně i do materiálů. Výpočetní jádro je vestavěný systém, obvykle vyžaduje reakci v reálném čase a je nejčastěji distribuováno“ [10]. Rajkumar je popisuje jako „fyzické a inženýrské systémy, jejichž provoz je monitorován, koordinován, kontrolován a integrován pomocí výpočetního a komunikačního jádra“ [11]. Nejvíce uznávanou definicí mezi odborníky je v dnešní době ta od prof. Lee, která zobecňuje CPS jako „propojení počítačů a fyzických systémů. Vestavěné počítače monitorují a řídí fyzikální procesy, které dokáží reagovat pomocí zpětné vazby. Díky tomu se fyzikální procesy a výpočty navzájem ovlivňují“ [12].

Obecně lze říci, že CPS jsou komplexní, multidisciplinární systémy nové generace, kde díky kooperaci výpočetních prvků dochází k ovlivňování stavu fyzických entit. Provoz CPS je monitorován, kontrolován a řízen pomocí kybernetické části. Zasluhou této spolupráce je možno přiřadit systémům vlastnosti, jež by normálně nemohli mít.

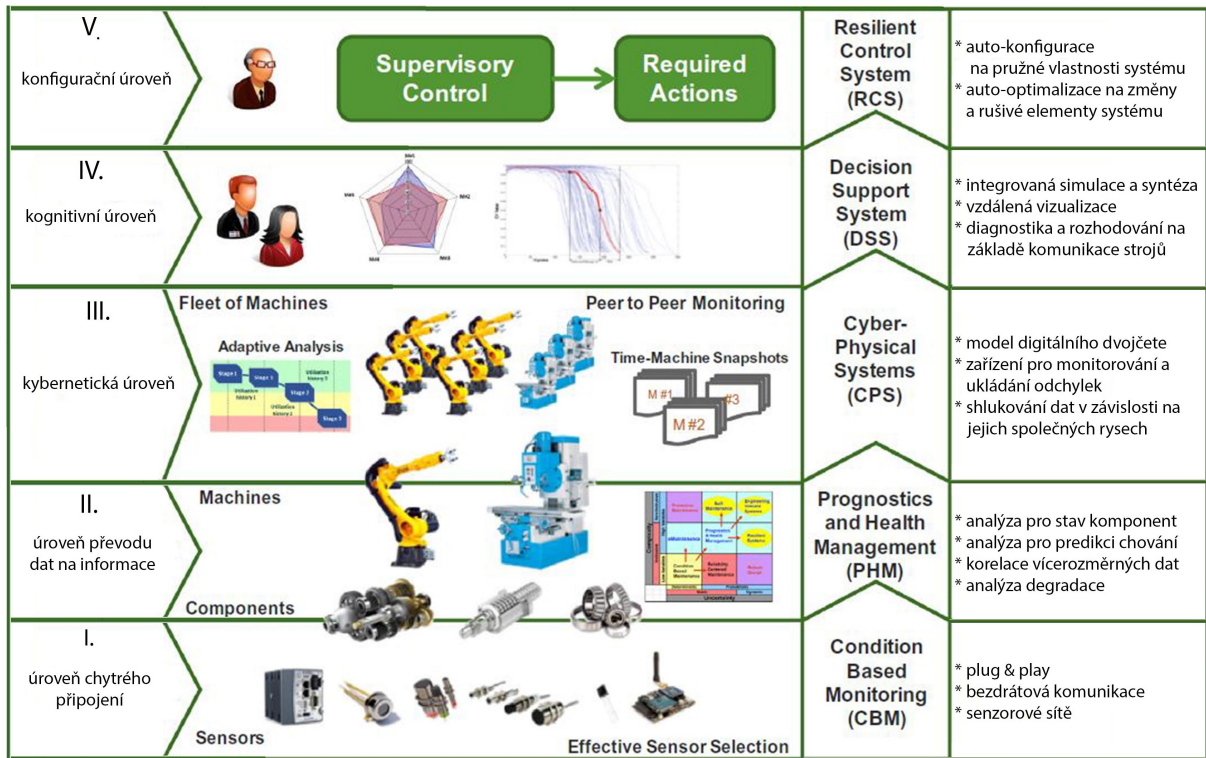
3.1.2. 5C architektura

Tato architektura je využívána pro návrh, vývoj a implementaci výrobních aplikací. Jedná se o chronologický postup, jak tento koncept navrhnout vrstvu po vrstvě. V úvodu této kapitoly bylo zmíněno složení CPS ze dvou částí, nicméně toto rozdělení je příliš obecné pro praktickou realizaci. Pro návrh je využita 5C architektura, která se skládá z 5 úrovní: chytré připojení, převod dat na informace, kybernetická, kognitivní a konfigurační úroveň (obr. 3.2). Nejnižší vrstva slouží ke sběru dat a naopak ty vyšší se zabývají analytickými metodami. Data je možné získat několika způsoby (například z podnikových systémů a čidel) a kvůli tomu se setkáváme s různými typy dat, které způsobují následné problémy se zpracováním. Důležité je také volit vhodné typy senzorů, aby byla data co nejvíce věrohodná a abychom se vyhnuli jejich zkreslení již v počáteční fázi. [13]

Pro detailnější porozumění návrhu kyber-fyzických systémů si podrobněji popíšeme jednotlivé vrstvy a jejich význam 5C architektury, kterou navrhl prof. Jay Lee (obr. 3.2).

I. úroveň – Chytré připojení

Jedná se o první, nejnižší vrstvu, která slouží ke sběru dat ze strojů nebo jejich částí. Data jsou získávána pomocí snímačů, které by měly být jednoduše integrovatelné do systému např. Plug & Play. Nebo moderních systémů pro řízení výroby, jako jsou MES (výrobní informační systém) nebo SCM (systém řízení dodavatelského řetězce). Nejdůležitějším



Obr. 3.2 Vrstvy 5C architektury [14].

kritériem je volba správného typu snímače pro konkrétní aplikaci. Neméně důležitou částí je také zajištění bezproblémového, rychlého a bezpečného přenosu dat na server pomocí vhodného protokolu [14].

II. úroveň – Převod dat na informace

Tato vrstva se stará o získání validních informací pomocí různých sofistikovaných algoritmů pro konkrétní řešení daného problému. Velice aktuálním tématem se stává monitoring kondice součástek (např. ložiska) v reálném čase, případně předvídání jeho budoucího chování. [14]

III. úroveň – Kybernetická vrstva

Kybernetická vrstva slouží jako centrální informační bod pro sběr dat z různých strojů, jež jsou k ní připojeny. Díky získání velkého objemu dat můžeme vytvářet hlubší a komplexnější analýzy a následně porovnávat například produktivitu strojů mezi sebou. [14]

IV. úroveň – Kognitivní vrstva

Tato vrstva ze získaných a vypočtených dat z předchozích úrovní zprostředkovává obsluhu vizualizaci o aktuálním provozním stavu a o případné možné poruše stroje. Vše by mělo být graficky a intuitivně zobrazeno pro snadnější vyhodnocení rizik a následnému včasnému zásahu obsluhy. [14]

V. úroveň – Konfigurační vrstva

Konfigurační vrstva slouží jako zpětná vazba z kybernetického prostoru do fyzického. Stroj je schopen se autonomně přizpůsobit změnám. Tato vrstva dále hraje roli systému řízení odolnosti (RCS), která na základě dat z kognitivní vrstvy umožňuje zavedení preventivních a nápravných opatření. [14]

3.1.3. Technologie pro realizaci CPS

Jednou z podstatných technologií v rámci CPS jsou agentní systémy. Ty jsou nasazovány na složité problémy, které by bylo velice obtížné či nemožné vyřešit pomocí standardních nástrojů. Avšak nejedná se o univerzální řešení, v některých případech je vhodnější využít strojového učení, neuronové sítě nebo jejich kombinaci. Agenti jsou autonomní výpočetní entity, které jsou schopné samostatného učení či plánování. Umožňují propojení fyzického a kybernetického světa a jsou schopné reagovat na dynamické změny. Způsob jakým spolupracují, aby vyřešili složitější úlohu, je inspirován z „živočišného“ světa.

Multiagentní systémy

Své kořeny mají multiagentní a agentní systémy v distribuované umělé inteligenci, kde jednotky schopné vyřešit daný cíl jsou označovány jako agenti. Pro pochopení dané problematiky multiagentních systémů je vhodné tedy definovat, co je to agent. Lze ho popsat jako autonomní prvek systému (u multiagentních systémů většinou softwarový), který je schopen jednat tak, aby dosáhl svého definovaného cíle. Prostředí, v kterém se nachází, dokáže monitorovat pomocí senzorů a také s ním dokáže intervat za pomoci aktuátorů (akční členy) [15]. Agent má obvykle schopnost komunikovat s ostatními agenty, vyhodnocovat data a provádět úkony, které se mohou dynamicky měnit.

Základní charakteristiky agenta je možné definovat na základě schopnosti odlišného způsobu řešení stejné problematiky pro dosažení daného cíle. Mezi ně řadíme:

- **Autonomie**

Jedná se o vlastnost agenta, který je schopen samostatného rozhodování bez nutnosti interakce s okolím či jinými prvky systému. Možnost komunikace s ostatními agenty je zde zachována (např. sdílení hodnot). [16]

- **Reaktivita**

Schopnost agenta reagovat na změny projevující se v jeho prostředí při zachování dosažení svého cíle. Obvykle má souhrn předem definovaných akcí, z kterých vykoná jednu na základě splnění požadovaných kritérií. [16]

- **Intencionalita**

Agent vytváří své plány a uvažuje nad dlouhodobými plány. Má také schopnost dekompozice složitých problémů a organizaci chování, jak dospět k danému cíli. [16]

- **Sociální chování**

Agenti jsou schopni vzájemné spolupráce shlukování se do skupin za účelem vzájemného prospěchu. Dále shromažďují informace o jednotlivých agentech a jejich „sociálních vazbách“ a na tomto základě vytváří vlastní úsudek. [16]

Na základě jejich racionality lze agenty dále rozdělit na:

- **Reaktivní**

Jedná se o nejprimitivnější formu agenta, který za pomoci čidel a aktuátorů přímo reaguje na měnící se situaci bez předešlé znalosti daného prostředí. [16]

- **Deliberativní**

Schopnost agenta plánovat své budoucí kroky a možnosti ovlivnění prostředí za účelem zisku nějaké výhody. Tento typ agenta není vhodný do proměnlivého prostředí. [16]

- **Kognitivní**

Jedná se o agenta, jež je schopný se sám učit a na základě svých znalostí vyvozovat logické úsudky či závěry z pozorování okolí. [16]

- **Racionální**

Jedná se o nejvyšší formu agenta, který je schopen samostatného učení a plánování. [16]

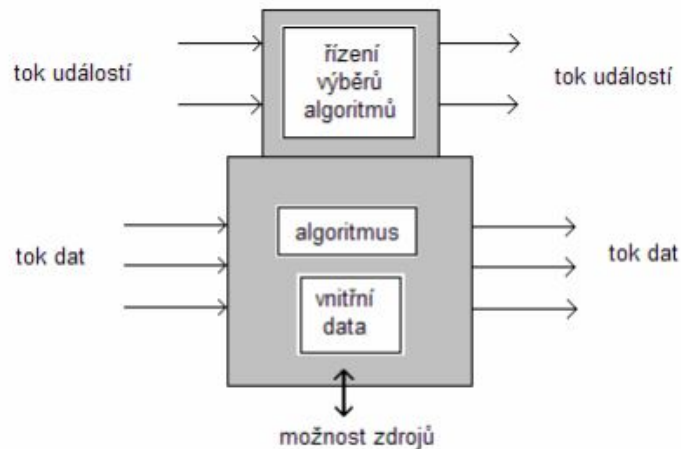
Hlavním myšlenkou multiagentních systémů je spolupráce více agentů, kteří se na základě společného úsilí snaží o vyřešení požadovaného úkolu, jenž by jeden agent nebyl schopen vyřešit. Může však nastat i situace, kdy každý agent pracuje na zcela odlišném problému, nicméně stále může kooperovat s ostatními např. sdílet hodnoty. Multiagentní systém je založený na vzniku decentralizovaných nebo distribuovaných inteligentních jednotek (agentů). Distribuované řešení je rozložení komplexnějšího problému na menší podčásti, na kterých budou jednotliví agenti spolupracovat (tzv. koordinace). Decentralizované řešení je zaměřeno spíše na individuální cíle agenta, „sociální“ vazby mezi jednotlivými agenty jsou menší než-li u předchozího typu. Nicméně z důvodu omezených schopností jednotlivých agentů zde zůstává možnost komunikace s ostatními agenty za účelem vytváření koalic pro dosažení cíle. Jednou z nevýhod tohoto systému je komplikovanost výpočtů a z toho plynoucí určitá časová prodleva systému. Na druhou stranu multiagentní systémy se vyznačují obrovskou spolehlivostí a odolností proti poruchám. [17]

Holonické systémy

Holonický systém se skládá z holonů poprvé definovaných Arthurem Koestlerem roku 1967. Holon měl sloužit k objasnění funkce sociálních organizací a živých organismů. Termín pochází z řečtiny a je složen ze dvou slov: holos – znamenající celek a on – znamenající část. Obecně bychom tedy mohli uvést, že holon je základním prvkem systému, jež obsahuje dílčí podsystémy, avšak je částí nějakého většího celku. Obsahuje části pro fyzické zpracování a zpracování informací (viz obr. 3.3).

V dnešní době je kladen veliký důraz na efektivitu a kvůli tomu se přistupuje k decentralizovanému řízení. V něm je zapotřebí, aby spolu jednotlivé entity spolupracovaly, proto dochází k implementaci holonických systémů. Další výhodou holonů je rychlost vykonávaných úloh, proto jsou používány pro řízení v reálném čase. Rozdíl oproti multiagentním systémům, kde agent je pouze softwarový, je jeho integrace ve fyzickém zařízení. Také je zde umožněno, aby jeden holon pod sebe sdružoval další – jeden holon může být součástí jiného a to i za předpokladu odlišnosti jednotlivých holonů. Spojování více holonů

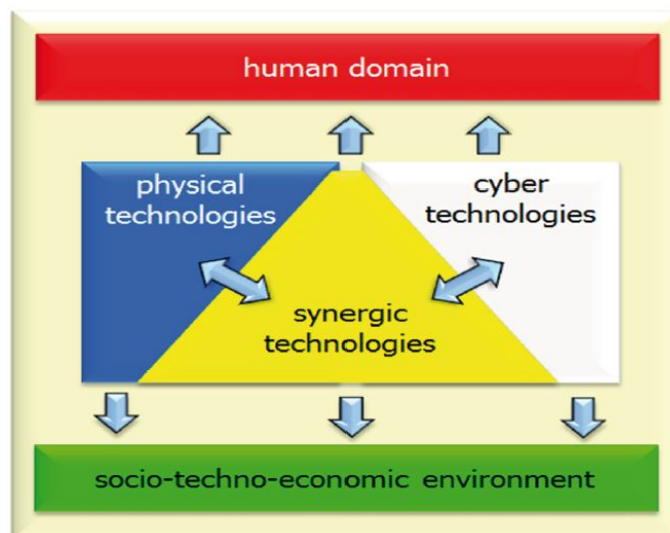
dohromady se nazývá holarchie a lze díky ní dosáhnout vyšší výkonnosti. V některých publikacích se můžeme setkat s označením „holonický agent“. Jedná se o rozšíření holonu o vlastnosti agenta, který je schopen fyzické reakce a následným zhodnocením svých akcí. [18] [19] [20]



Obr. 3.3 Popis holonu [20].

3.1.4. Nový pohled na architekturu CPS

Z rozvojem technologií a miniaturizací zařízení se pomalu ale jistě dostáváme do fáze, kdy nebude úplně možné jednoznačně definovat hranice mezi kybernetickým a fyzickým světem (příkladem lze uvést virtuální realitu). Z tohoto důvodu byl vědci představen poupravený model CPS doplněný o synergickou část. Ta by se měla skládat z digitálních mikrochipových technologií, senzorů a senzorických sítí a elektromechanické technologie. Díky synergické části by mělo dojít k zajištění hlubšího propojení mezi fyzickým a kybernetickým světem (obr. 3.4). [4]



Obr. 3.4 Nový model CPS [4].

Digitalní mikrochipové technologie

V důsledku rozvoje technologií a nanotechnologií, kde velikost senzoru může být na molekulární úrovni se pomalu dostáváme do stavu, kdy tyto technologie budou moci být umístěné téměř na čemkoliv a jejich energetická náročnost bude velmi malá. Podobný rozmach nastává i v oboru IT, kde dochází k rozšiřování cloudových služeb. Neméně důležitou problematikou je zpracování obrovského množství různorodých dat, Big data. Avšak jsou tu i další problémy, které budeme muset do budoucna vyřešit, aby byly CPS schopné pracovat s velkými daty ze senzorů. Je velmi důležité, aby latence CPS při vyhodnocování dat byla v řádech nano sekund. Z tohoto důvodu je také nutnost navýšení výpočetní kapacity. Jedním z možných řešení by mohly být kvantové počítače, které vše nesmírně urychlí. [4]

Senzory a senzorické sítě

Jedním z velmi důležitých prvků, které pro CPS představují „smysly“, jsou senzory. Jejich signály jsou dále přenášeny pomocí clusterů nebo senzorových sítí – dochází zde k převodu a přenosu signálu. Vše je řízeno pomocí agentních systémů (viz kap.3.1.3). Architektura bezdrátových senzorových sítí (WSN) vychází z ISO/OSI modelu (návrh sítě pomocí 7 vrstev). Všechny úrovně je nutné vhodně zvolit, např. pro první fyzickou vrstvu vybrat vhodnou bezdrátovou síť (bluetooth, Zigbee). Data jsou transferována pomocí senzorových uzlů do paměti a pomocí hlavního uzlu dále zpracována, k čemu je nezbytný nenáročný operační systém např. široce rozšířený Tiny OS. Novodobé senzory obsahují jak hardwarovou tak i softwarovou část a jsou schopné vyhodnotit některé události (poloha, gesto) bez nutnosti dalšího hardwaru. Zajisté je nutné do budoucna vyřešit některé problémy např. agregace dat, zpracování síťových dotazů, bezdrátovou komunikaci, bezpečnost a energetickou náročnost. [4]

Mikroelektromechanické technologie

CPS jsou převážně malá sofistikovaná zařízení, sestavená z mnoha miniaturních částí. K tomu, aby tyto části mohly být co nejmenší a přitom umožňovaly inteligentní chování, je nutné použít vhodné technologie, jako jsou nanotechnologie a mikroelektromechanické technologie, také označované jako MEMS. Tyto technologie spojují mikroelektrické a mikromechanické komponenty o velikosti v jednotkách až desítkách mikrometrů. Jejich celková velikost je od desítek mikrometrů až do 1 mm. Díky rozvoji molekulární chemie a technologií je také možné zhotovit organické entity. Díky mikrorobotice dochází k rozvoji miniaturních strojů na úrovni mikrometrů. Za zmínku stojí mikro chapadla, ohybové klouby a mnoho dalších. Postupným vývojem se pomalu propracováváme k nano robotice, kde by se mělo jednat o kombinované molekulární složky, které jsou schopné měnit svůj tvar a vlastnosti, aby dosáhly svého cíle. Jednou z vizí vědců je návrh nano stroje, jenž by umožňoval zhotovení předmětů rozličných velikostí atom po atomu. [4]

3.1.5. Komunikační technologie

Jednou z vlastností CPS je komunikace s ostatními entitami v rámci dané sítě nebo i mimo ní. Síť lze definovat dle geografického pokrytí (LAN), topologie (hvězda), architektury

zpracování (P2P) a technologie připojení (TCP/IP). V CPS je přenos signálu rozlišován dle druhu signálu, obsahu a způsobu přenosu.

Způsob přenosu je rozdělen na dva typy – drátový a bezdrátový. Bezdrátový přenos je však upřednostňován na místech, kde je to z technických důvodů možné. Z důvodu přenosové rychlosti nejsou vždy vhodnou volbou. Mezi výhody bezdrátových sítí patří flexibilita, snazší výměna či upgrade, levnější pořizovací náklady. Dnešní novodobé bezdrátové sítě jsou schopné se autonomně konfigurovat do sítí typu Ad hoc – v těchto sítích si jsou všechna zařízení rovnocenná neexistuje zde centrální řídicí jednotka. [4]

3.2. Virtuální dvojčata

Jedná se o virtuální reprezentaci fyzického objektu nebo složitějších systémů v průběhu jeho životního cyklu. V dnešní době se touto problematikou zabývá několik velkých firem jako jsou GE, IBM, Siemens a nebo Microsoft. Jedna z možných definic virtuálního dvojčete, v některých zdrojích uváděné i jako digitální dvojče, zní: „Virtuální dvojče je imaginární kopie fyzického zařízení, systému a procesu, která je provázaná s Cloudem. Na ten jsou zasílána provozní data, na základě kterých může docházet k testování a k predikcím budoucího chování systému“ [21].

Prvním průkopníkem, který s virtuálními dvojčaty experimentoval, se stal roku 2002 John Vickers z NASA. Zajímal se o provoz, údržbu a opravy systémů, jež se nachází ve vesmíru, a také o snížení nákladů s tím spojených. V roce 2003 byla tato idea použita Michaelem Grivesem, který ji poprvé rozpracoval pro použití v průmyslovém sektoru – firma McLaren ji aplikovala k vytvoření virtuálního dvojčete jejich závodního vozu.

Pokud se například testuje systém ABS v automobilu, je na výběr z mnoha variant. Můžeme se použít automobil a vyzkoušet systém v mnoha různých situacích, což určitě není rychlý ani levný přístup. Z těchto důvodů se přešlo k simulacím pomocí softwaru. Jedná se o levnější a efektivnější řešení, které je však závislé na přesnosti matematického modelu daného problému včetně definování počátečních podmínek. Největší nedostatek tohoto přístupu je v tom, že celý model je většinou simulován za ideálních podmínek. Mezi výhodami virtuálního dvojčete je schopnost práce s daty z reálného zařízení, protože dochází ke získání podrobných dat z provozu v reálných podmínkách.

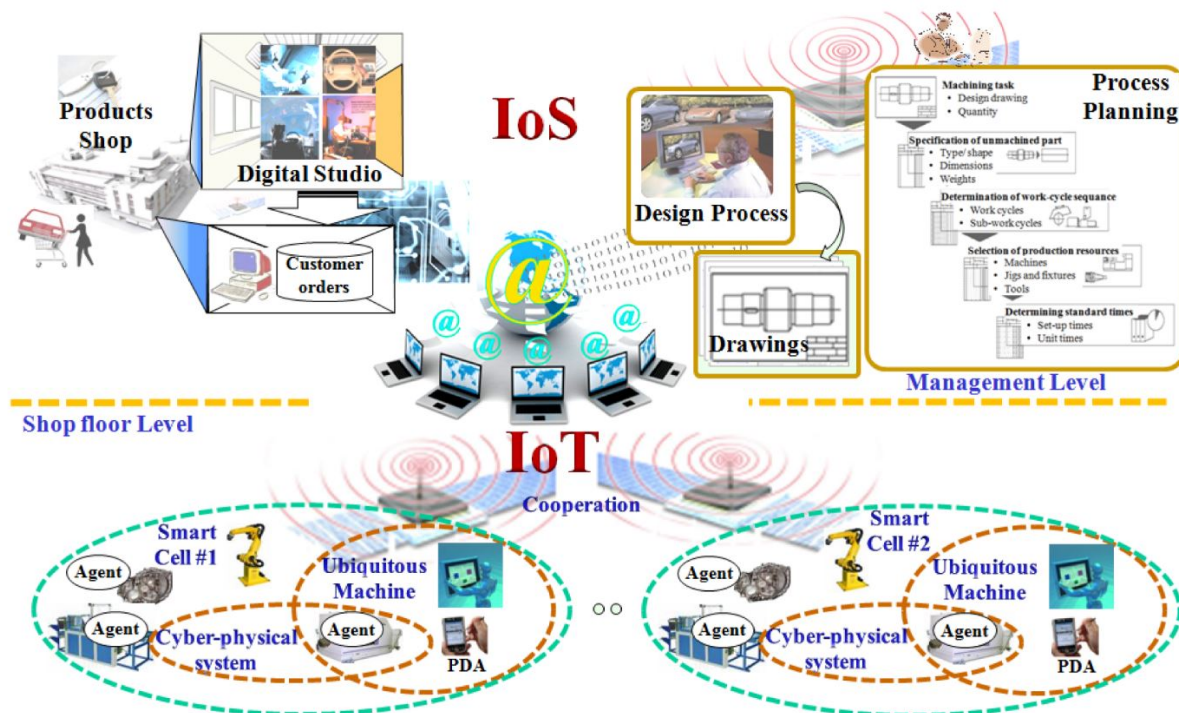
Hlavní rozdíl mezi virtuálním prototypem a virtuálním dvojčetem je v odlišnostech jejich vytváření. Virtuální prototyp je vytvářen na základě zjednodušeného matematického modelu při uvážení teoretických podmínek, zatímco virtuální dvojče využívá data z reálného světa, tudíž se jedná o přesnější model.

Je důležité také zmínit, že ne vždy je vhodné vytvářet virtuální dvojče. Vždy záleží na složitosti nahrazované entity. Může se stát, že místo zjednodušení a zefektivnění dojde k pravému opaku. [21] [22] [23]

3.3. Aplikace 5C architektury v rámci inteligentní továrny

Pro lepší pochopení souvislostí mezi některými výše popsány termíny bude demonstrace provedena na celkovém schématu inteligentní továrny, viz obr. 3.5. Objednání výrobku na míru je velice snadné – jediné, co je zapotřebí, je přístup k internetu. Na webových strán-

kách výrobce je možnost nadefinování kýžného výrobku (Shop floor Level) a následně prostřednictvím internetu dojde k přeposlání požadavku do výrobní firmy. Ta na tomto základě vytvoří plán výroby (Management Level), který následně bude zaslán pomocí internetu věcí (IoT) do jednotlivých strojů CPS. Obě tyto části by se daly zahrnout do internetu služeb (IoS), který je podrobně posán v následujícím článku [24]. IoT se využívá jako kanál pro komunikaci s ostatními CPS nebo, jak je v obrázku znázorněno, s inteligentními buňkami (Smart Cell). Vhodné je také zmínit, že komunikace mezi jednotlivými CPS nemusí probíhat pouze prostřednictvím IoT, další možností je např. komunikace pomocí M2M (stroj se strojem). Využití IoT je lépe škálovatelné, z tohoto důvodu je častěji využívána.



Obr. 3.5 Schématické znázornění inteligentní výroby [25].

Pro připomenutí, kyber-fyzický systém je autonomní prvek, který je schopen přizpůsobivého chování, reakce v reálném čase na změny v systému a kooperace s obdobnými entitami. Autonomnost systému je zde zprostředkována pomocí agentních systémů, na jejichž základě je možné, aby se systém mohl sám rozhodovat a učit. [25]

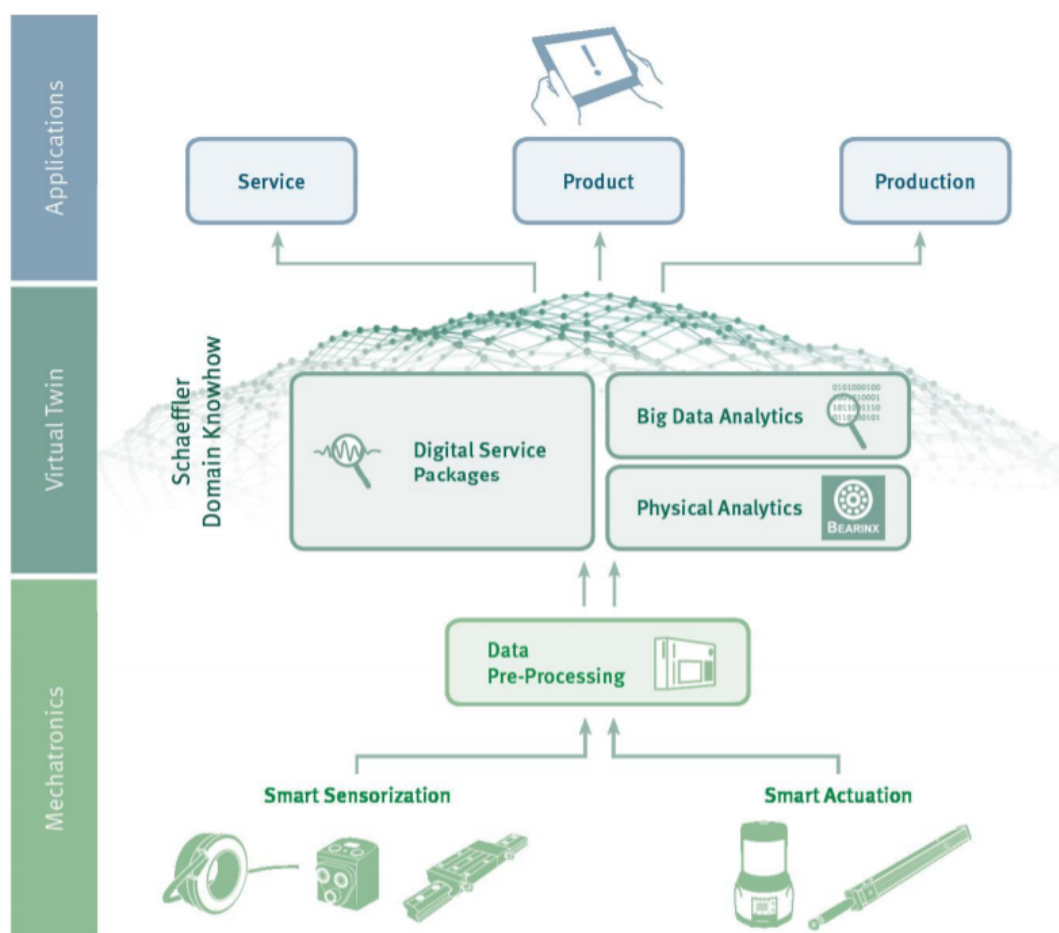
3.4. Komerční řešení chytrých ložisek

Následující kapitola bude popisovat současnou nabídku výrobců v oblasti chytrých ložisek a v některých případech i celých systémů. Mnoho výrobců má svůj vlastní uzavřený systém a odmítá komunikovat s cizím zařízením. Může tak být zaručena větší bezpečnost zařízení, nicméně, pokud systém nebude otevřený, nemůže dojít k jeho masovému využití. Veškeré níže uvedené informace jsou aktuální k roku 2020. Jedná se o podklady, které byly poskytnuty výrobcí, či byly volně dostupné na internetových stránkách.

3.4.1. Schaeffler Smart EcoSystem

V roce 2017 na konferenci v Hannoveru firma Schaeffler představila svůj Smart EcoSystem (obr. 3.6). Tento systém nabízí komplexní podporu od hardwarové úrovně až po softwarovou, jež je převážně založena na Cloudu. Komponenty, jako je například chytré ložisko, jsou vybaveny snímači zaznamenávající data, která jsou zpracována pro následnou analýzu. Systém dává výrobcům a provozovatelům vstup do jednoduché aplikace, kde je řada služeb, jež je možné dle potřeby aktivovat. Pomocí diagnostiky a následného zpracování dat můžeme zjistit životnost ložiska, případně jeho zatížení. Z těchto informací je možné predikovat případné poškození stroje, kterému se je možné vyhnout včasnou opravou.

Smart EcoSystem od společnosti Schaeffler se rozdělí do 3 částí na mechatronickou, část virtuálního dvojčete a aplikační.



Obr. 3.6 Smart EcoSystem [26].

Aplikační vrstva

Aplikační vrstva slouží k vizualizaci získaných dat z části nazvané digitální dvojče. Lze ji rozdělit do 3 částí: údržbu, produkt a výrobu, kde pro každou část jsou podstatná různá data. Tato vrstva se zaměřuje na predikci chyb, produktivitu stroje a snížení nákladů na výrobu. Sběr dat a následná analýza je nedílnou součástí průmyslu v budoucnosti, avšak v omezené míře se využívá již nyní. Vizualizaci může využít obsluha například ke včasnému zásahu v kritický okamžik, než dojde k porušení stroje. [26]

Digitální dvojče

Jedná se o část, kde jsou data získaná ze senzorů převáděna na užitečné informace. Na jejich základě dochází například k predikcím prouhu a díky tomu je možné optimalizovat chod stroje. Patří sem také zpracování Big data, prediktivní údržba, či vytváření virtuálních dvojčat. Může být velice matoucí, že firma Schaeffler nazývá část svého systému Digitální dvojče. Nejedná se o digitální dvojče jako takové. To provádí simulaci v reálném čase na základě reálných dat, viz sekce 3.2.

Mechatronická část

Jedná se o nejnižší úroveň zahrnující mechatronické zařízení, které je schopné monitorovat různé fyzikální veličiny. Posléze jsou tyto hodnoty předpřipraveny (zesílení signálu případně jeho tvarování) k dalšímu zpracování. Do této mechatronické části spadá více komponent, které jsou popsány níže. [26]

FAG VarioSense

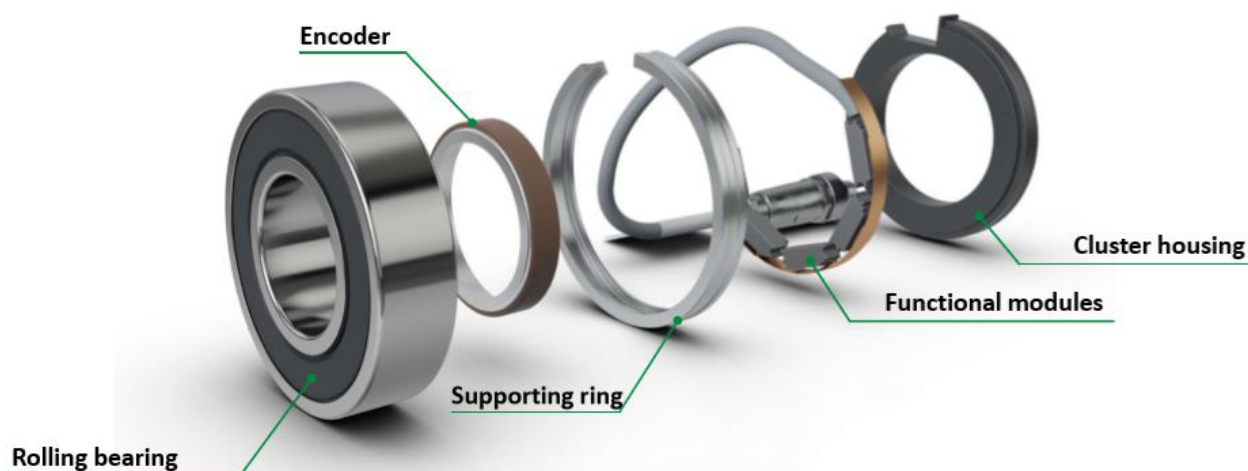
FAG VarioSense je chytré ložisko skládající se ze standardního ložiska a senzorové části, jež je široká pouhých 7 mm. Ložiska se vyrábí s integrovanými snímači rychlosti, teploty a posunutí. Jedná se o jednořadá kuličková ložiska o velikosti 6205-C až 6210-C. Předpokládaná životnost senzorové části ložiska je navržena tak, aby byla schopna vydržet až 10 let při splnění podmínek stanovených výrobcem. K dispozici máme na výběr z různých kombinací snímačů, jejichž přehled je v tabulce 3.1.

Product configuration	Sensor			Interface unit
	Speed	Temperature	Displacement	
001	•	–	–	Optional
002	•	•	–	•
003	•	•	•	•
004	–	–	•	•

Tab. 3.1 Možné konfigurace ložiska

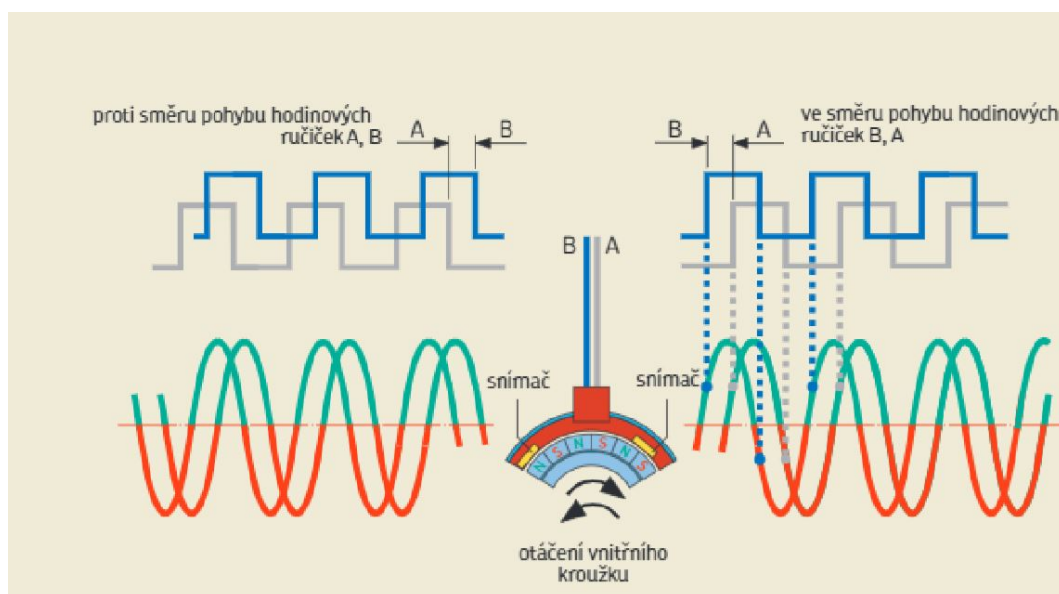
Firma Schaeffler nabízí ložisko až se třemi snímači. Prvním z nich je snímač teploty, který stanovuje hodnoty v rozmezí $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ s přesností měření $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dále encoder – snímač pro určení smyslu otáčení a rychlosti, která může dosahovat maximálních otáček až $1790,7\text{ rad/s}$ (17100 ot/min). Posledním typem je snímač pro určení zatížení, který je schopen stanovit radiální a axiální posunutí s rozlišovací přesností $1\text{ }\mu\text{m}$. Do budoucna se počítá s rozšířením, jako je například nový typ snímače pro měření vibrací nebo bezdrátový přenos dat.

3.4. KOMERČNÍ ŘEŠENÍ CHYTRÝCH LOŽISEK



Obr. 3.7 Struktura chytrého ložiska [26].

V následující části je rozebrána struktura chytrého ložiska, která je na obr. 3.7. Při pohledu zleva je klasické valivé ložisko, za ním magnetický impulsní kroužek. Dle velikosti ložiska se na kroužku nachází určitý počet severních a jižních pólů (56-96), který v kombinaci s Hallovou sondou umístěnou na funkčním modulu tvoří encoder. Jeho výstupem jsou dva fázově posunuté signály, z nichž jeden je považován za referenční a druhý je posunutý doprava nebo doleva. Z fázového posunutí jsme schopni určit směr otáčení a podle počtu pulzů jeho polohu a rychlost. Princip funkce encoderu je popsán na obr. 3.8.

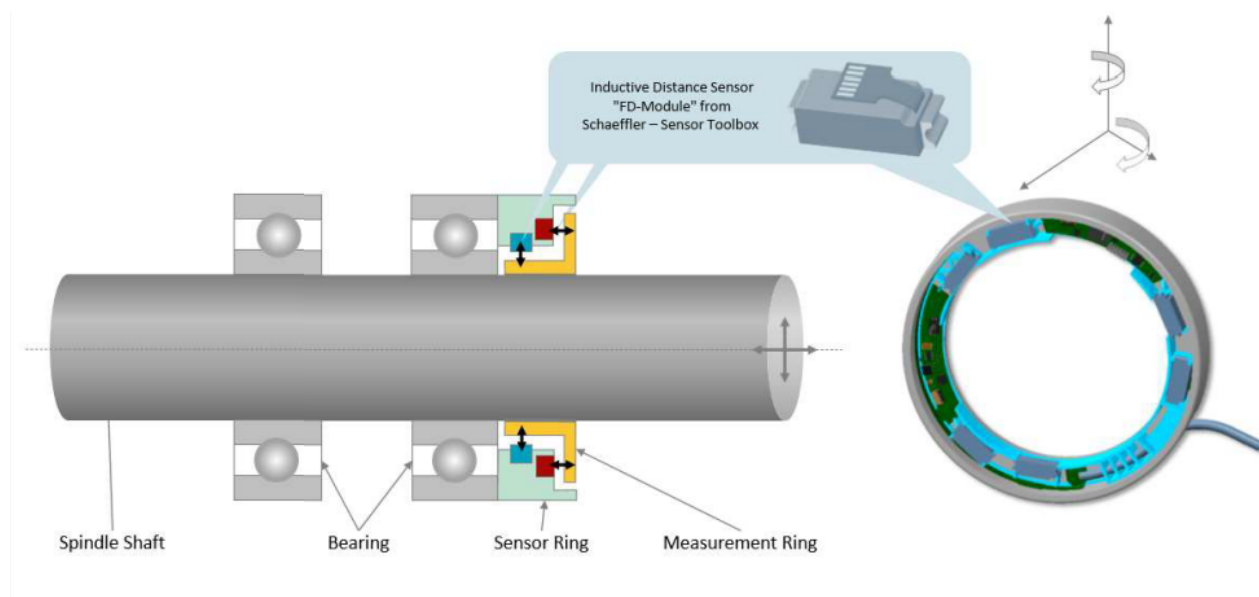


Obr. 3.8 Činnost encoderu [27].

Další prvek slouží pouze jako nosná a krycí část. Jedná se o podpůrný kroužek, který fixuje funkční modul v konkrétní poloze. Funkční modul je soubor snímačů opatřených digitálním výstupem ve formě konektoru. Je zde umístěný snímač teploty, Hallova sonda a případně i snímač zatížení, který na obrázku 3.7 není znázorněn. Poslední částí je Cluster, jež slouží k uzavření a utěsnění senzorové části ložiska.

3.4. KOMERČNÍ ŘEŠENÍ CHYTRÝCH LOŽISEK

Následně je popsán princip měření za předpokladu uvažení pouze senzoru posunutí, jež je zobrazen na obr. 3.9. Sensorická část je v tomto případě složena ze senzoru pracujícího na základě indukce a kroužku, jež je v řezu ve tvaru písmene L z důvodu možnosti měření radiálního a axiálního posunutí. Jak se hřídel v ložisku otáčí a je zatěžována (např. nahoru a dolů), mění se vzdálenost senzorů od kroužku (většinou z feromagnetického materiálu), který je zde namísto magnetického impulsního kroužku. V tomto důsledku dochází ke změně detekovaného magnetického toku senzorem a na jeho základě dochází ke stanovení posunutí. [26] [2]



Obr. 3.9 Praktické použití snímače posunutí [2].

FAG SmartCheck

Jedná se o on-line systém pro trvalé monitorování strojů pomocí vibrací, založený na piezoelektrickém akcelerometru s rozsahem 0,8 Hz - 10 kHz a doplněný snímačem teploty s rozmezím -20 až 70 °C. Zařízení v sobě taktéž obsahuje databázi různých přístrojů (např. motor, ložisko), kde jsou shromážděna data o frekvencích jednotlivých komponentech při bezporuchovém stavu. Následně jsou používány jako etalon s právě probíhajícími měřeními.

Při aplikaci na přístroj, jež není v databázi, dojde k využití funkce teach-in, pomocí které se aktivuje učící se mód. Stroj je po určitou dobu monitorován při běžném provozu. Po ukončení fáze učení začne systém s monitorováním, kdy nás případně pomocí alarmu upozorní na vznik možného poškození. K měřeným hodnotám je možný přístup i pomocí vlastního webového rozhraní.

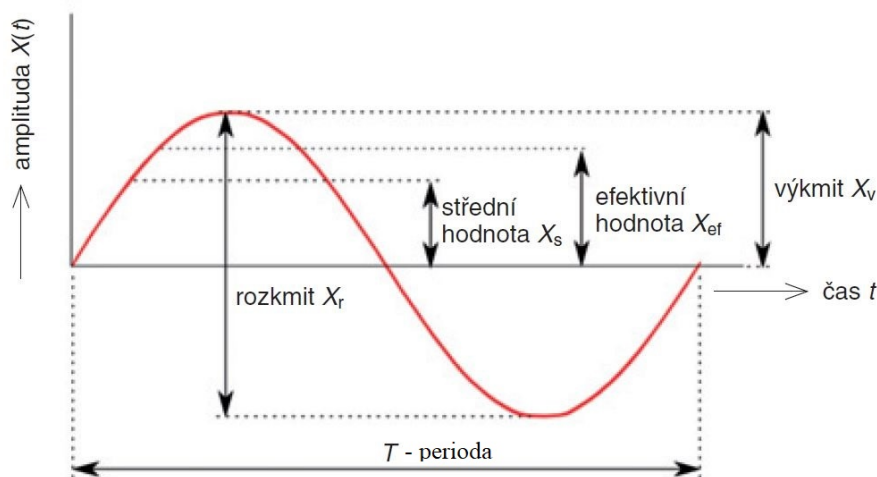
Na zařízení (viz obr. 3.10) se nachází 3 konektory: konektor 1 slouží jako analogový výstup/digitální vstup pro připojení dalšího čidla, konektor 2 slouží pro propojení s PC za účelem správy SmartChecku nebo přenosu zaznamenaných dat, konektor 3 slouží pro propojení více zařízení SmartCheck a pro přívod napětí 16-32 V. [28]



Obr. 3.10 SmartCheck monitorovací systém [29].

Princip měření Měření je prováděno pomocí akcelerometru, jehož princip je založen na piezoelektrickém jevu – při působení síly (tlaku) na krystal dojde k vytvoření elektrického náboje. Pomocí akcelerometru lze měřit veličiny jako jsou výchylka, rychlost a zrychlení, které jsou spolu navzájem svázány matematickými vztahy (integrace, derivace). V úvahu budeme brát akcelerometr, jímž budeme měřit zrychlení. [30]

Signál může být vyhodnocen v časové nebo frekvenční oblasti, kde každý typ má své klady i zápory. Při rozboru signálu v časové oblasti dochází k vyhodnocení kmitavého pohybu (výchylky) v závislosti na čase. Poté se provede analýza kmitů na základě jejich charakteristických parametrů, jako je například rozkmit či výkmit, viz obr. 3.11.



Obr. 3.11 Parametry pro vyhodnocení časového průběhu [31].

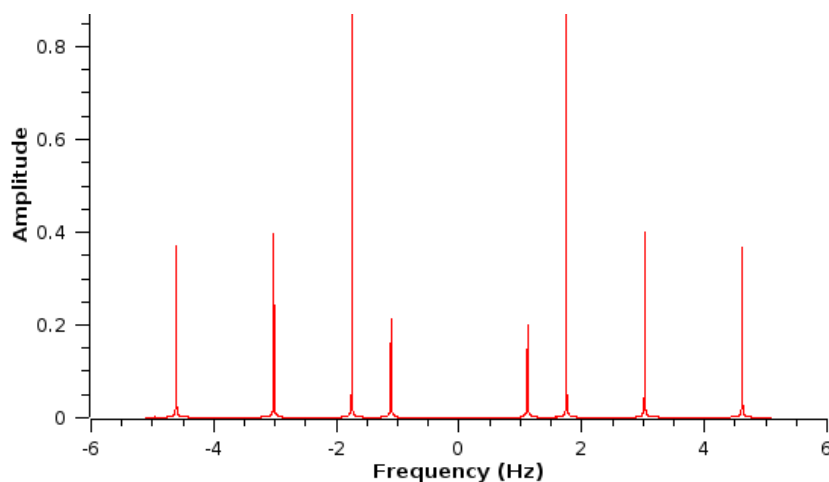
Dalšími možnostmi je vyhodnocování celkového kmitání. Naměřená hodnota je porovnávána s hodnotami uvedenými v normách, na jehož základě lze vyhodnotit aktuální stav. Jedná se spíše o informativní metodu, nicméně je snadná a rychlá. Další informativní metodou je vyhodnocení parametru K_t , kde pomocí rovnice 3.1 dojde ke stanovení hodnoty, která je následně opět porovnávána s normovanými hodnotami a na jejíž základě lze určit dobrý, poškozený či havarijní stav.

$$K_t = \frac{a_r(0)a_{ef}(0)}{a_r(t)a_{ef}(t)} \quad (3.1)$$

Popis významu jednotlivých členů v rovnicích:

$a_r(0)$ rozkmit zrychlení za předpokladu nového ložiska [$m \cdot s^{-2}$]
 $a_{ef}(0)$ efektivní hodnota zrychlení za předpokladu nového ložiska [$m \cdot s^{-2}$]
 $a_r(t)$ rozkmit zrychlení v čase t [$m \cdot s^{-2}$]
 $a_{ef}(t)$ efektivní hodnota zrychlení v čase t [$m \cdot s^{-2}$]

Daleko sofistikovanější metodou je analýza ve frekvenční oblasti, z které dostaneme fázové a amplitudové spektrum. Základem pro výpočty je užití Fourierovy transformace (Rychlá Fourierova transformace a Diskrétní Fourierova transformace), nicméně se jedná o náročnou problematiku na níž odkazuje např. [32]. Obrovskou výhodou této metody oproti analýze v časové oblasti je možnost detekce poruch jednotlivých částí (např. poškození klece či valivých členů ložiska). Na obr. 3.12 je zobrazeno frekvenční spektrum. [31]



Obr. 3.12 Frekvenční spektrum [33].

Mazací systém – FAG Concept

Nesprávné mazání může způsobit zkrácení životnosti stroje či jeho poruchu. Z důvodu zvýšení kvality a životnosti je vhodné užití automatického mazacího systému, či automatické maznice, které jsou schopny v přesně stanovený čas dávkovat potřebné množství mazacího média tam, kde je to zapotřebí. U mazacích systémů je možné mazání až několika desítek různých míst najednou. Celý systém je automatický a u některých je možnost řízení pomocí PLC. Jedním z takových systémů je FAG Concept2, viz obr. 3.13. Z kazety s mazivem je mazivo dávkováno pomocí pístového čerpadla, v rámci systému mohou být i 2. Každé z nich má svůj výstup a lze jej ovládat nezávisle na sobě.

Mazací systémy jsou v této práci zmíněny z důvodu vhodného doplňku k chytrému ložisku, chytrému snímači, dálkovému řízení a Cloud computingu. Tím se získá komplexnější samoobslužné řešení, kde je minimalizován lidský faktor. [34]



Obr. 3.13 Automatický mazací systém FAG Concept2 [35].

3.4.2. SKF Insight

Jedná se o koncept bezdrátového systému, který sbírá data o provozním stavu ložiska a monitoruje jeho životní cyklus pomocí senzorů. Data jsou získána pomocí bezdrátových senzorů s vlastním napájením a následně bezdrátově přenášena a analyzována. Prvně byl tento systém představen na veletrhu v Hannoveru v roce 2013. Po dobu dvou let byl vyvíjen a následně testován v reálném provozu. SKF Insight pod sebou schovává řešení inteligentních senzorů, jako je například: Insight Rail, který můžeme nalézt na moderních vlacích, SKF Motor Encoder, který je používán pro detekci stavu ložiska v elektromotorech, a mnoho dalších. Tyto senzory jsou navrženy tak, aby jejich instalace byla co možná nejjednodušší. SKF Insight je aplikován ve větrných elektrárnách, kde poškození ložiska a jeho následná výměna je velice nákladnou záležitostí. Dále bude zmíněno řešení SKF motor encoder Unit, které není řešeno pomocí bezdrátových technologií s vlastním napájením. Nicméně do této kategorie patří a reprezentuje pravou podstatu inteligentního ložiska, kde jsou senzory implementovány přímo v ložisku. Do budoucna se předpokládá absence připojovacího kabelu a taktéž jeho energetická nezávislost.

SKF Motor Encoder Sensor

SKF Motor Encoder Sensor (viz obr. 3.14) je mechatronická součástka skládající se z univerzálního ložiska SKF, která patří do třídy Explorer, a senzorické části. Ta se skládá z impulsního magnetického kroužku a tělesa se snímačem teploty, rychlosti a smyslu otáčení. Vše je uloženo v pouzdru o velikosti 6,2 mm. Ložiska jsou dostupná ve velikostech BMB – 6202 až 6209.

Kompozitní magnetický kroužek dle velikosti ložiska obsahuje 32-80 severních a jižních pólů. Pro detekci rychlosti a směru otáčení se v části se snímači nachází Hallova sonda a další elektronika sloužící k zesílení výstupního signálu. Ten je následně pomocí Schmittova klopného obvodu (tvarovače pulzů) převeden na obdélníkový signál. Smysl otáčení ložiska je opět stanoven na základě vzájemného posunutí náběžných hran (viz kapitola 3.4.1). Čidlo je schopné měřit natočení v ložisku s přesností 1,4°. Maximální dovolená rychlost otáčení je vždy závislá na typu ložiska, jež deklaruje výrobce. Snímač teploty je schopen snímat v rozsahu -40 až 120 °C. Celá jednotka splňuje normu EN 50082-2, a



Obr. 3.14 Konstrukce ložiska se senzorovou částí [27].

proto je možné ji používat také ve velmi zarušeném elektromagnetickém prostředí. Toto rušení může být odstraněno díky použitím Faradayova efektu – rozložení elektrického náboje pouze na povrchu vodivé části pouzdra. Uvnitř tedy nepůsobí žádné elektrické nebo elektromagnetické pole a dojde tak k odstínění nežádoucího rušivého vlivu okolí. Tyto ložiska jsou především určena pro použití do asynchronních strojů. [27]

SKF Fiber Optic Sensing

V roce 2019 na veletrhu v Hannoveru představila firma SKF ložisko, jehož provozní stav je monitorován pomocí optického vláknového deformačního senzoru. Tuto technologii si také nechalo patentovat, více o patentu se dočtete [36]. Obrázek 3.15 zobrazuje konstrukční řešení výše zmíněného ložiska.

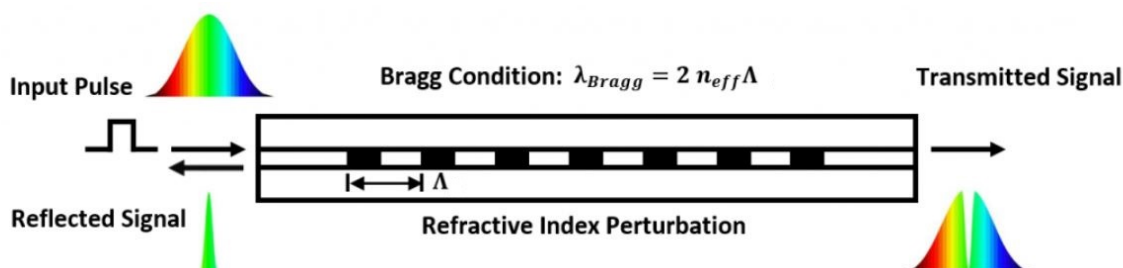


Obr. 3.15 Ložisko s optickým senzorem SKF [37].

3.4. KOMERČNÍ ŘEŠENÍ CHYTRÝCH LOŽISEK

Podle slov společnosti SKF se jedná o první komerčně nabízené řešení s touto technologií. Na vnějším kroužku ložiska jsou vytvořeny drážky, do kterých je pevně fixováno optické vlákno s deformačním optickým senzorem. Nepohyblivé spojení s ložiskem je nezbytné z důvodu přenosu veličin, jako je napětí a teplota, na které je senzor citlivý. Na tomto základu lze detekovat zatížení, teplotu, vibrace, rychlost či poškození ložiska. Výhoda tohoto řešení spočívá v možnosti užití i v nebezpečném prostředí, taktéž je možné signál vést na dlouhé vzdálenosti.

Technologie snímání je založena na Braggově mřížce, v některých publikacích je označována jako FBG. V podstatě se jedná o selektivní zrcadlo určité vlnové délky světla (filtr), který se nachází v optickém vláknu a je velký jen několik mm. Při procházení světelného paprsku Braggovou mřížkou dochází k odrazu určité vlnové délky světelného paprsku, zbylá část může volně projít. Tento princip je zobrazen na obr. 3.16. [38]



Obr. 3.16 Část optického vlákna s Braggovou mřížkou [39]

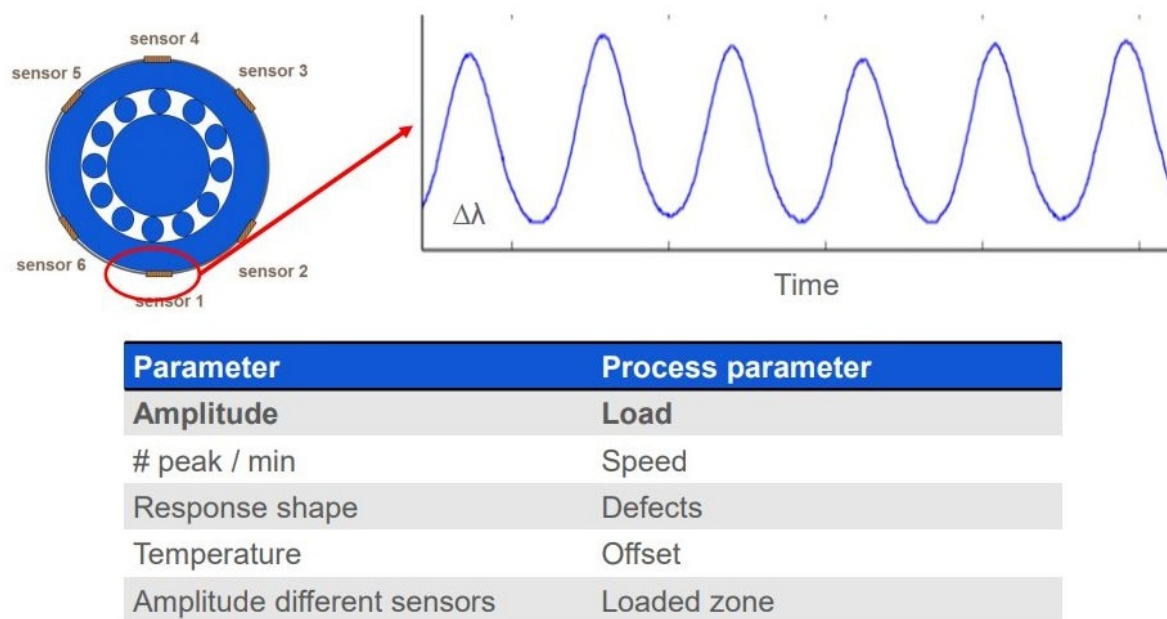
Takto odražený detekovaný signál Λ se řídí rovnicí 3.2 a je určen periodou mikrostruktury a indexem lomu jádra. Jeho hodnota je také závislá na okolních podmínkách. Při zatížení vlákna dochází ke geometrické změně mřížky v senzoru (periodě mřížky Λ). V případě působení teploty na senzor dojde ke změně indexu lomu.

$$\lambda_b = 2n_{eff} \cdot \Lambda \quad (3.2)$$

Popis významu jednotlivých členů v rovnicích:

- n_{eff} efektivní index lomu mřížky
- λ_b odražená vlnová délka (Braggova vlnová délka)
- Λ perioda mřížky

Detekovaný odražený signál je základem pro určení dalších fyzikálních veličin. Obrázek 3.17 ukazuje, na jakém základě jsou následně tyto veličiny určovány. Mezi obrovskou výhodou této technologie patří multiplexace, tj. užití více senzoru na jednom vlákne s tím, že každý senzor může detekovat jinou fyzikální veličinu [40].



Obr. 3.17 Stanovení jednotlivých fyzikálních veličin [41].

SKF Insight Rail

SKF Insight Rail viz obr. 3.18 je bezdrátový snímač pro monitorování kol železničních vozidel. Skládá se ze senzoru vibrací, senzoru teploty, GPS modulu a vlastního napájení ve formě lithium-thionyl chloridové baterie, která zaručuje chod senzoru po dobu 3 let. Snímač je schopen stanovit rychlost kola a zrychlení do 60G. Teplotu je možná detekovat v rozsahu -40 až 85 °C.

Senzor vyhodnocuje poškození na základě vibrací – každý typ poškození má své specifické vibrace. Ve spojení s daty o teplotě a následnou analýzou dat je možné predikovat současný stav ložiska a jeho případné budoucí poškození. Pro zpracování signálu dřívější verze nutně potřebovaly další hardware, jež byl umístěný na vozidle, a zároveň musel být fyzicky propojen s řídicí jednotkou. Předchozí verze byla vylepšena – čidla již umožňují bezdrátový přenos dat, která jsou zaslána do cloudu, kde se mohou dále analyzovat. Tyto snímače se využívají především ve vysokorychlostních vlacích (Pendolino, ETR 500) nebo v hromadné dopravě (metro). [42]



Obr. 3.18 Použití snímače na železničním vozidle [42].

Chytré snímače

Do této kategorie patří snímače, jež jsou schopny měřit provozní stavy rotačních entit (ložiska) na základě vibrací a teploty. Jedná se především o bezdrátová zařízení s vlastním napájením, která jsou velmi snadno aplikovatelná téměř na jakémkoliv zařízení, většinou pomocí magnetu či šroubu. Ty nejjednodušší, jako je SKF QuickCollect sensor (viz obr. 3.19), mohou nalézt uplatnění např. u servisních techniků. Ti jsou díky chytrému telefonu a vhodné aplikaci schopni se pomocí bluetooth připojit na daný senzor a zjistit tak stav ložiska. Pro stále umístění na strojích se využívá podobného zařízení označeného SKF Wireless Machine Condition Sensors. Zařízení pro svoji komunikaci využívá protokol WirelessHart, který podporuje mesh síť (všechna zařízení jsou spolu navzájem propojena), jelikož ne všude je z technických důvodů možné použít Wi-Fi. Princip snímání je totožný, jako bylo uvedeno v sekci 3.4.1.



Obr. 3.19 SKF QuickCollect Sensor [43].

Intelligentní pouzdro

Intelligentní pouzdro (viz obr. 3.20), též označované jako ložisková příruba se senzory, je odnoží chytrého ložiska s masivním krytem, ve kterém jsou všechny snímače zabudovány. Nalézá se zde senzor teploty, rychlosti či vibrací. Navíc se ve spodní části pouzdra nachází deska s elektronikou pro zesílení signálu a ochrana proti přepětí ze sítě. Výstupem z pouzdra jsou dva konektory: jeden slouží pro získání údajů o rychlosti a teplotě, druhý konektor přenáší informace o vibracích. Jejich monitorování se provádí pomocí piezoelektrického akcelerometru (čidlo vibrací), který může monitorovat axiální vibrace, a pomocí nastavitelného držáku senzoru je možné měření radiálních vibrací. Rychlost měříme pomocí magnetického kroužku a Hallovy sondy, která se nachází uvnitř pouzdra. Intelligentní pouzdro se nabízí ve variantách s čidlem teploty a rychlosti nebo jen s čidlem vibrací či se všemi čidly dohromady.

Intelligentní pouzdro je možné například využít pro aplikace na ventilátor. Ten může poskytnout včasné varování před nerovnováhou způsobenou nečistotami na lopatkách.

3.4. KOMERČNÍ ŘEŠENÍ CHYTRÝCH LOŽISEK

Nevyvážený ventilátor bude generovat vibrace, které mohou nakonec způsobit poruchu. [44]



Obr. 3.20 Inteligentní pouzdro [44].

V dnešní době existují i bezdrátové senzory, jež se upevní do ložiskové příruby a plní stejnou funkci. Tyto senzory v převážné většině vyhodnocují stav ložiska na základě detekce vibrací a teploty. Následně je možné za použití speciálních softwarů detekovat poškození ložiska. Některá řešení komunikují přímo i se smartphony pomocí bluetooth, kdy pro reprezentaci dat stačí stáhnutí aplikace od daného výrobce. Jedním z takových výrobců je například firma ABB se svým ABB Ability Smart senzorem (viz obr. 3.21).



Obr. 3.21 ABB Ability Smart senzor umístěný v přírubě [45].

3.4.3. NTN

Tato sekce popisuje technické řešení chytrého ložiska se senzory od firmy NTN, která si jej nechala i patentovat viz [46]. Výrobce jej označuje jako integrované ložisko se snímačem úhlové rychlosti. Toto řešení je nabízeno pro různé velikosti ložisek, viz tab. 3.2, a umožňuje monitorování rychlosti a směru otáčení.

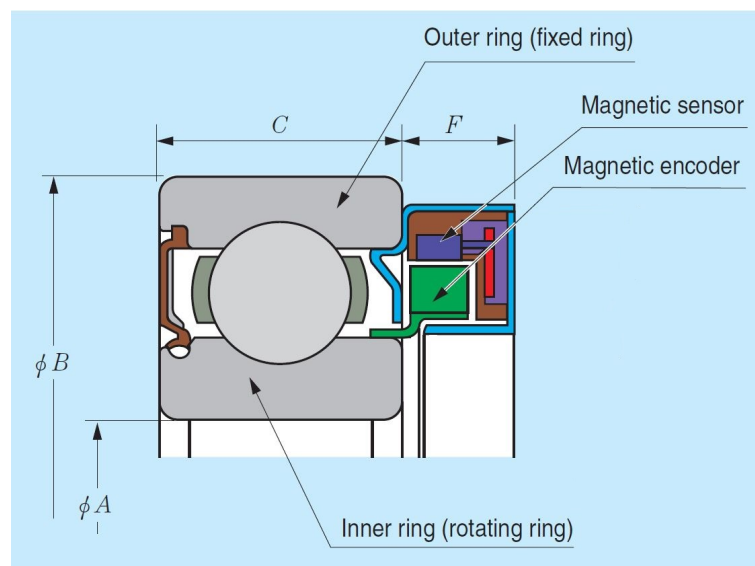
Následně je popsán složení senzorové části, která je připevněna k ložisku, viz obr. 3.22. Ta je složena ze zesilovacího obvodu, Shmittova obvodu, výstupního tranzistoru

3.4. KOMERČNÍ ŘEŠENÍ CHYTRÝCH LOŽISEK

Modelové číslo ložiska	6202	6204	6206	6208	6209
šířka vnitřního kroužku A (mm)	15	20	30	40	45
šířka vnějšího kroužku B (mm)	35	47	62	80	85
šířka ložiska C (mm)	11	14	16	18	19
šířka sensorového modulu F (mm)	7,5				
počet výstupních pulzů	32	48	64	80	80
Počet gen. signálů	2 (signál A a B)				

Tab. 3.2 Nabízené varianty ložiska se sensorovou částí.

a senzoru pro měření magnetického pole – hallové sondy, která se nachází v přídruženém kroužku upevněného k vnějšímu kroužku ložiska. Někdy je také místo hallové sondy možné použití magnetorezistoru – součástka, která mění svůj odpor na základě magnetického pole. Naproti hallově sondě je připevněný k vnitřnímu kroužku ložiska enkodér složený ze severních a jižních magnetických pólů. Místo magnetů je také možno využít zakřiveného magnetizačního drátu ze slitiny železa, kobaltu, chromu a vanadu, který je složen z magnetizovaných vícepólových částí. Na konci každé magnetické části dochází ke změně polarity v důsledku protilehlých pólů. Při započetí otáčení vnitřního kroužku začne hallova sonda detekovat změnu magnetického pole a produkovat výstupní obdélníkový elektrický signál. Při následném zpracování signálu je z něj možno vyvodit informace o rychlosti. Za použití alespoň 2 hallových sond můžeme určit i směr otáčení na základě fázového posunu výstupních signálů. Při použití více senzorů lze docílit většího počtu pulsů na jednu otáčku, a tím získáním přesnějších hodnot. Standardní provedení výše uvedených ložisek je možno používat do hodnoty 120 °C. Magnetický obtokový kroužek je využíván jako ochrana v některých aplikacích (např. elektromotory), kde se nachází silné elektromagnetické pole, kvůli kterému by mohlo dojít k chybám či nepřesnostem měření. [47]



Obr. 3.22 Řez ložiskem NTN [47].

3.5. Souhrnný přehled inteligentních ložisek

Tato sekce má za úkol podat souhrnný přehled zmíněných komerčních řešení chytrých ložisek, viz tab. 3.3. Ta jsou rozdělena dle „druhu“ chytrého ložiska, tj. ložiskové příruby se senzory a klasického ložiska se senzorickou částí. Další rozdělení je provedeno podle jednotlivých firem, aby bylo možné snadněji porovnat odlišnosti u jednotlivých řešení výrobců. Přehled je taktéž doplněn o základní snímané veličiny.

Základní měřené veličiny

Rychlost

Vůbec první měřenou veličinou v oblasti chytrých ložisek byla úhlová rychlost a směr otáčení. Princip měření úhlové rychlosti je založen na hallově jevu a z rozdílů fází dvou měřících kanálů je možné určit směr otáčení.

Teplota

Teplota je důležitá hned z několika důvodů. V prvé řadě může detekovat poruchu ložiska, kdy při poškození dochází k odlupování šupinek materiálu. Následkem je zvýšení tření a nárůst teploty, což může být podnětem pro kontrolu ložiska. Dále lze zmínit problematiku provozních teplot pro maziva. Na základě sledování teploty je možné upravit prostředí tak, aby nedocházelo k předčasnému stárnutí maziva.

Vibrace

Vibrace se nejčastěji měří pomocí akcelerometru. Jedná se o často používanou metodu pro detekci stavu ložiska. Pro rozlišení jednotlivých poškození se využívá vlastnost, že většina vad, ať se již jedná o poškození valivých členů, klece atd. má své specifické frekvence. Díky tomu lze určit o jaký typ poškození se jedná.

Posunutí

Nejrozšířenější způsob měření této veličiny je pomocí dvou odporových tenzometrů, kde je každý použit pro jednu osu (x,y). Jak již bylo zmíněno u maziva, i ložisko je konstruováno na určité provozní podmínky. Tudíž není vhodné jej dlouhodobě přetěžovat, jinak bude docházet k většímu opotřebení a s tím spojené snížení trvanlivosti. Díky posunutí lze pomocí Hookova zákona zpětně určit zatěžovací sílu působící na ložisko.

Výrobce	Typ ložiska	Název	Měřené veličiny					Připojení	
			Rychl.	Směr otáč.	Tepl.	Posun.	Vibr.	Drát.	Bezdrát.
Schaeffler	lož. + sensor. část	FAG VarioSense	x	x	x	x	x	x	
	chytrý snímač	FAG SmartCheck			x		x	x	
NTN	lož. + sensor. část	Motor Encoder Units	x	x				x	
SKF	lož. + sensor. část	Motor Encoder Sensor	x	x	x			x	
	chytrý snímač	QuickCollect			x		x		x
	chytrý snímač	Insight Rail			x		x		x
ABB	chytrý snímač	ABB Ability Smart Sensor			x		x		x

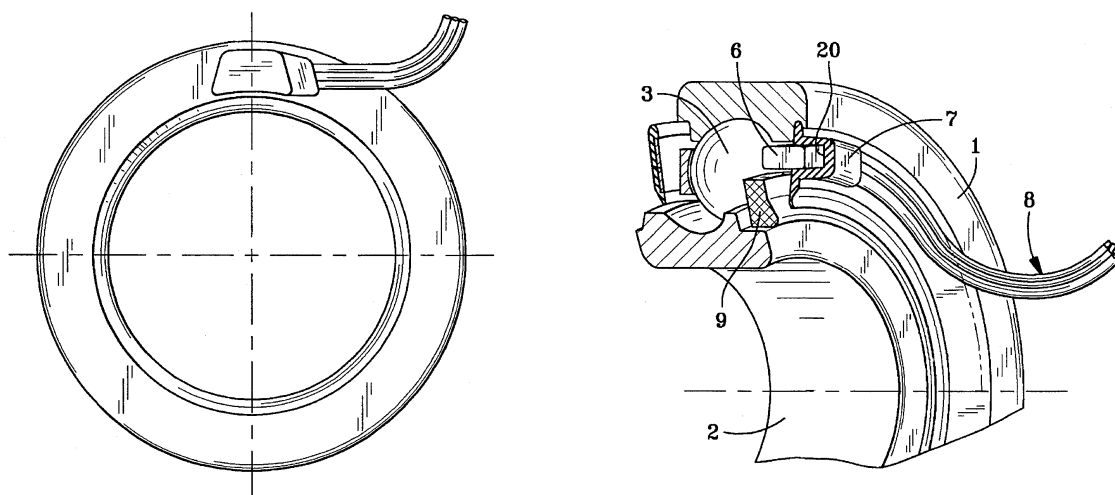
Tab. 3.3 Přehled chytrých ložisek a snímačů

3.6. Firmy a jejich patentová řešení chytrých ložisek

V následující části je popsán koncept chytrého ložiska, jež je zatím ve stádiu vývoje a testování, jelikož v současné době nebylo uvedené na trh. Avšak konkrétní řešení firem těchto technologií byla patentována. V patentové databázi se vyskytuje nespočetné množství různých patentů od 80. let až do současnosti, tato práce se zmiňuje jen o některé z nich. V blízké budoucnosti se však můžeme dočkat uvedení chytrých ložisek na trh, jelikož některé společnosti (např. firma Timken) deklarovaly vyvinout toto ložisko v rámci Průmyslu 4.0.

3.6.1. Timken

Tento patent se týká ložiska, jehož senzory jsou uloženy v těsnění a připojovací kabel je z něj vyveden ven, viz obr. 3.23. Tímto řešením by se mělo docílit kompaktnějších rozměrů. Ložisko je složeno z pevného vnějšího kroužku (1), valivých členů (3) a vnitřního axiálně pohyblivého kroužku (2). Ten se stává nosným prvkem pro kódovací část (9) – multipolární magnetický kroužek. Následně je ložisko utěsněno pomocí těsnění (20), které je připevněno k nepohyblivému vnějšímu kroužku, v kterém jsou umístěny senzorické moduly (6). Obvykle se jedná o hallovu sondu v množství jednoho nebo více kusů, která slouží pro snímání signálu. Přípojný kabel obdélníkového tvaru (8) je chráněn pomocí objímky (7) a opouští těsnění ložiska pod úhlem po jeho vnější straně. V patentu není uvedeno, jaké veličiny jsou na ložisku měřeny. Nicméně kombinace hallové sondy a magnetického kroužku napovídá, že se s největší pravděpodobností bude jednat o měření úhlové rychlosti a natočení. Je také možné, že do těsnění mohou být implementovány další senzory (například senzory teploty). [48]



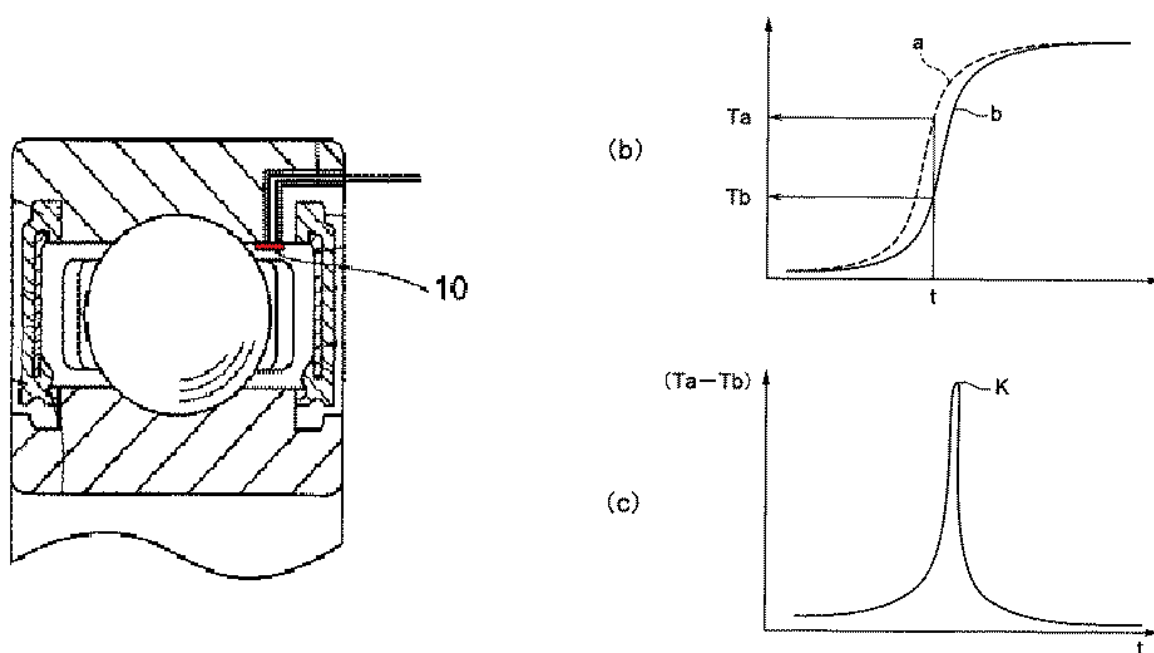
Obr. 3.23 Koncept ložiska se senzorem od firmy Timken [48].

3.6.2. NSK

Tento patent, který znázorňuje obr. 3.24, popisuje technické řešení detekce poruchy v ložisku například u valivých členů. Toho je docíleno pomocí měření rozdílu teploty na dvou senzorech, na jehož základě může být detekován neobvyklý stav – porucha. Standardní

3.6. FIRMY A JEJICH PATENTOVÁ ŘEŠENÍ CHYTRÝCH LOŽISEK

ložisko je vybaveno teplotním senzorem (10), které je umístěno na vnitřní části vnějšího kroužku. V tomto kroužku je také vytvořený otvor pro vývod signálu pomocí vodičů. Pouzdro teplotního senzoru obsahuje 2 čidla teploty – jedno z nich je umístěno blíže k valivým elementům a druhé je od něj posunuto. Senzor je vyroben pomocí naprašovací technologie za použití polymerálního materiálu a platinových elektrod. Na obrázku (b) můžeme vidět teplotní závislost na čase jednotlivých teplotních senzorů v pouzdře. Teplota T_a naměřená na prvním senzoru je vykreslena čárkovanou čarou (a) a teplotu T_b druhého senzoru udává plná čára (b). Rozdíl teplot T_a a T_b charakterizuje nárůst teploty v ložisku. Nejvyššího rozdílu $T_a - T_b$ se dosáhne při rychlém nárůstu teploty, a tím je také možné detekovat poruchu ložiska (bod K obr. c). [49]



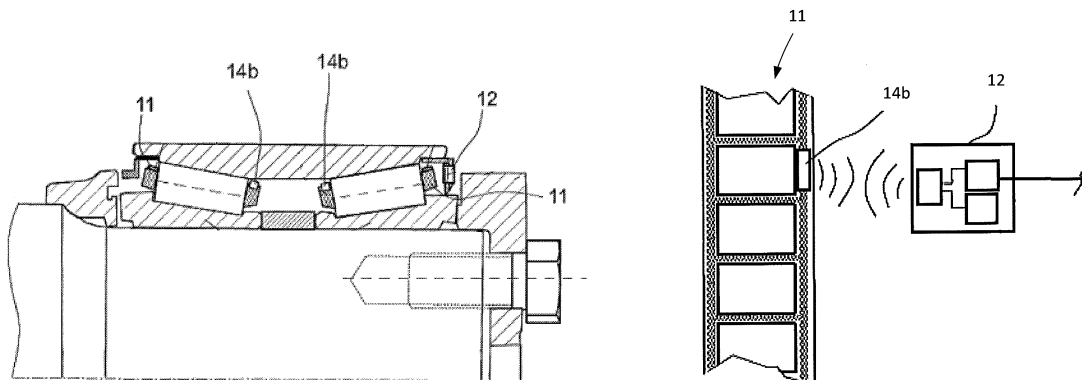
Obr. 3.24 Koncept chytrého ložiska navržený firmou NSK [49].

3.6.3. SKF

Předmětem zkoumání v patentovém řešení firmy SKF (viz obr. 3.25) je detekce poškození klece ložiska. Ta je vytvořena z polymerního materiálu a obsahuje pasivní rezonanční prvek s anténní cívkou (11) – většinou se jedná o tenkou vodivou vrstvu, která je zapuštěna v kleci nebo přímo na jejím povrchu a může být vytvořena například pokovením. Důležitým faktorem je, aby bod zlomu této vrstvy (materiálu) byl menší nebo roven bodu zlomu polymerního materiálu klece. Při prasknutí anténní cívkky nebo části klece dojde k přerušení rezonance. Také je možné použití více smyček, které jsou spolu paralelně spojeny. V případě přerušení jedné z nich dojde k poklesu indukčnosti rezonančního obvodu a v důsledku toho i ke změně amplitudy generovaného signálu. Pasivní rezonanční obvod (14b), který je umístěný v kleci, může být zhotoven dvěma různými způsoby. V prvním typu jde pouze o kondenzátor, jenž využívá anténní cívkku jako induktor – primitivní LC oscilátor. Druhým řešením je použití RFID čipu (identifikace na rádiové frekvenci), který je opět připojený k anténní cívkce. Toto řešení je výhodné z důvodu implementace dalšího senzoru do pouzdra nebo možnosti komunikace s ostatními senzory umístěnými na kleci

3.6. FIRMY A JEJICH PATENTOVÁ ŘEŠENÍ CHYTRÝCH LOŽISEK

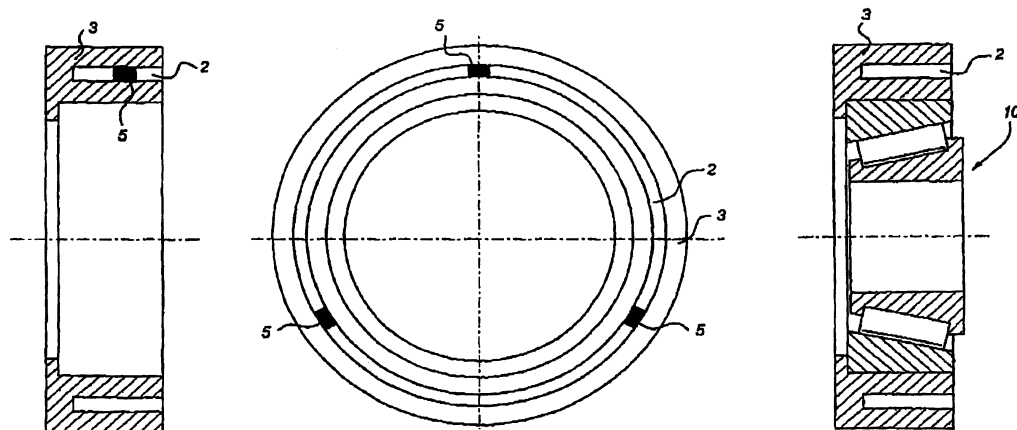
například s teplotním čidlem. Aby mohl RFID čip fungovat, potřebuje z nějakého zdroje získat energii, aby se jeho vnitřní kondenzátor mohl nabít a zpětně odeslat data. Z tohoto důvodu je v těsnění ložiska umístěna úložná jednotka (12) obsahující vysílač, generátor a obvody pro předzpracovávání přijatého signálu. Tento koncept je vhodný pro větší ložiska, kde klec může tyto entity pojmout. [50]



Obr. 3.25 Koncept chytrého ložiska SKF [50].

Detekce zatížení

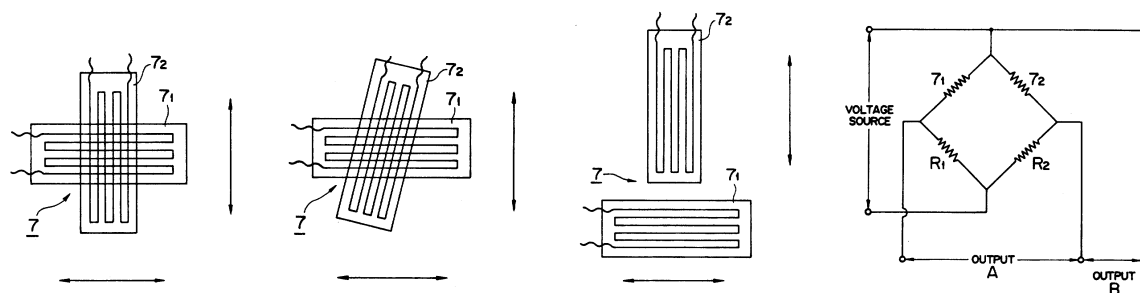
V tomto patentovém řešení je posán způsob měření zatížení ložiska, viz obr. 3.26. Toho je docíleno při použití běžného ložiska (10) vsazeného do snímacího kroužku (3), v kterém je vytvořena drážka (2), do níž je umístěn alespoň jeden senzor (5). Snímací kroužek by měl přiléhat k vnitřnímu nebo vnějšímu kroužku ložiska v závislosti na kýženém směru měření. Jednou z výhod tohoto řešení je možnost vyrábět odděleně snímací část, tudíž by mohlo dojít k použití na libovolném ložisku. Při zatížení ložiska dojde k rozložení síly po jednotlivých valivých elementech, které následně zatíží vnější kroužek ložiska – dojde zde k posunutí. Z důvodu těsného spojení ložiska se snímacím kroužkem dojde k přenosu posunutí i v této komponentě. Měření je následně prováděno v oslabené části (drážce) pomocí senzoru. Bylo zjištěno, že ideální rozměr drážky pro maximální detekci posunutí je stejná jako vzdálenost mezi 2 valivými prvky. Dále jsou v patentovém dokumentu popsány varianty obsahující více drážek v senzorovém kroužku, nebo také použití více senzorových jednotek, které mohou být různého typu (piezoelektrický, tlakový, kapacitní, atd.). Zpracování signálu probíhá pomocí snímání diferenciálního zatížení, tudíž je zapotřebí použít alespoň dva senzory. Tento způsob měření by měl být vhodnější než běžně používané metody založené na odporových tenzometrech, kde jejich přesnost je teplotně závislá. [51]



Obr. 3.26 Měřicí zařízení a použití na ložisku [51].

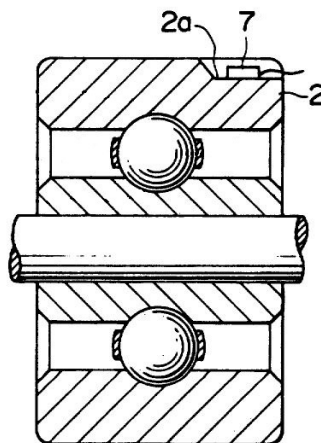
3.6.4. Koyo

Popisované řešení se týká ložiska se sensorovou jednotkou. Ta je tvořena za použití dvou tenzometrů, které jsou vhodně uspořádány na vnějším kroužku ložiska. Jejich rozložení může být dvojího typu (viz obr. 3.27) – mohou spolu svírat úhel 90° nebo se jen křížit pod úhlem. Na tomto základě můžou být získávány informace například o aktuálním působení sil na ložiska (zatížení).



Obr. 3.27 Rozmístění tenzometrů včetně můstkového zapojení [52].

Na obr. 3.28 je zobrazen řez ložiska včetně sensorové části. Pro to, aby mohla být na ložisko umístěna sensorová část obsahující tenzometry (7), je nutno ve vnějším statickém kroužku ložiska (2) vytvořit drážku (2a). Můstkové zapojení generuje výstupní signál z každého tenzometru. Díky tomuto zapojení a umístění tenzometrů blízko sebe nedochází k negativnímu ovlivňování měření v důsledku teploty. Princip měření tenzometrem spočívá v měření deformace díky ní je z měření možné určit zatížení dle Hookova zákona. Zaznamenávané hodnoty z prvního tenzometru tedy definují radiální napětí na vnějším kroužku, což nám dává informaci o zatížení. Zatímco hodnoty napětí z druhého axiálně uloženého tenzometru nejsou ovlivněny radiálními silami – velikost zatížení nemá žádný vliv na druhý tenzometr. Jelikož je tedy druhý tenzometr invariantní na zatížení, jeho hodnoty reprezentují pouze veličinu teploty. [52]



Obr. 3.28 Řez Ložiskem [52].

3.7. Vědecké studie

V této sekci jsou zmíněné některé z řady vědeckých studií, které dokreslují pozadí vývoje inteligentních ložisek. Z důvodu omezeného rozsahu práce byly vybrány 3 studie, jež rozšiřují přehled uvedený v této práci.

3.7.1. Inkrementální snímač pohybu

Tato vědecká studie se zabývá monitorováním stavu ložiska pomocí měření relativního posunutí. Využívá se inkrementálního snímače pohybu (dále již jen IME, Incremental Motion Encoder), který je schopen rozpoznání poruch i při nízkých rychlostech.

IME vychází z optického kodéru, jehož princip je obdobný jako u magnetického (viz kapitola 3.4.1). Rozdíl spočívá v odlišných senzorech – místo halové sondy je zde použita dioda, která osvětluje prázdné okénko, a součástka pro detekci světla. Magnetický kroužek je zde nahrazen kotoučem s okénky.

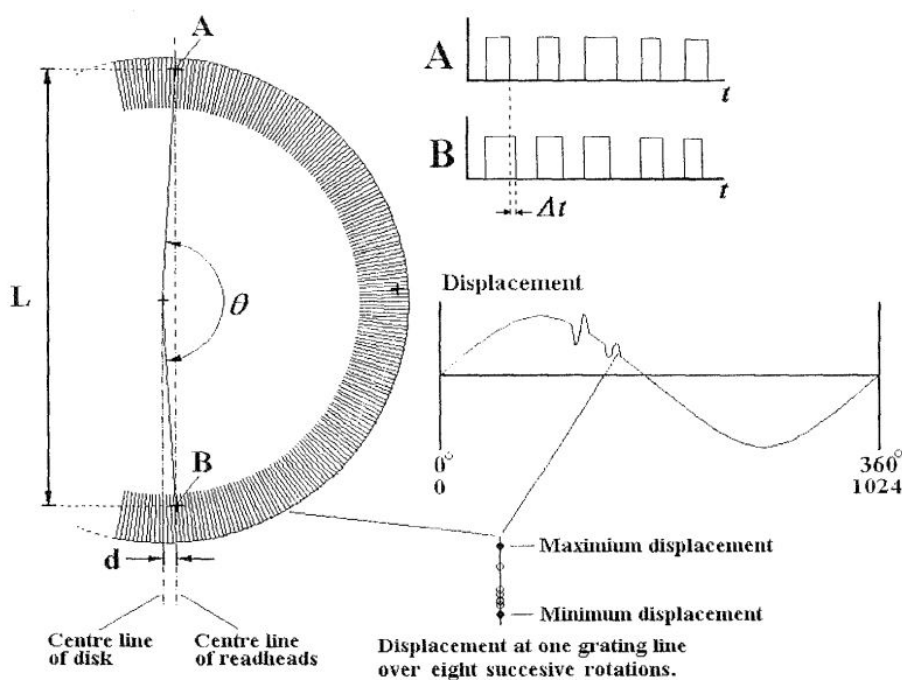
IME je složeno ze 4 senzorů, jež jsou uloženy po 90° v ložiskové přírubě (tzv. housing). Na hřídeli, která je uložena v ložisku, je připevněný kotouček, z něhož jsou následně odečítány hodnoty. Měření posunutí středu disku je stanoveno na základě měření protilehlých hlav (viz obr. 3.29). Kde posunutí středu se řídí podle rovnice:

$$d = \frac{(\pi - \theta)L}{4}, \quad (3.3)$$

kde L reprezentuje roztečnou vzdálenost mezi senzory A a B, d značí posunutí středu v μm , θ je úhlový rozdíl mezi senzory vypočtený z časového rozdílu Δt výstupního časového signálu A a B, viz obr. 3.29.

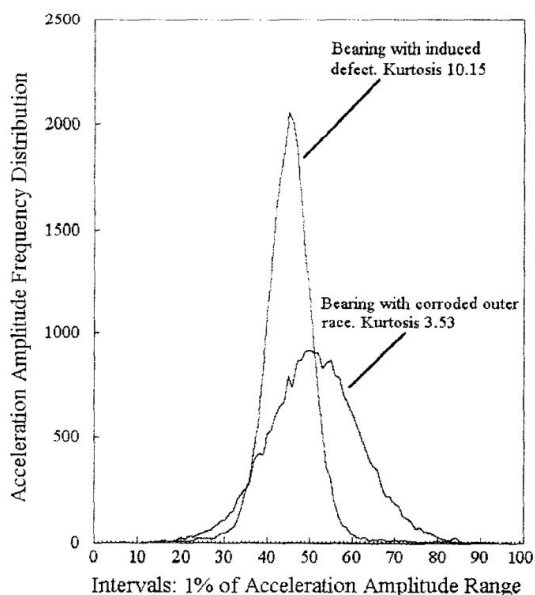
Následně je do grafu vynesena závislost posunutí na úhlových otáčkách. Tato závislost má sinusový tvar (viz obr. 3.29) a je vytvořena pro jednu osu. Do výstupní sinusové charakteristiky se promítne nejen poškození ploch valivých členů případně valivé dráhy, ale také např. zatížení. Za použití hodnot z údajů z obou os dostaneme výsledný pohyb středu ložiska (hřídele). Z výsledného posunutí je také možné určit střední rychlost hřídele a její zrychlení.

Pokud je ložisko správně namazáno, pak dojde k náhodnému rozdělení amplitudy zrychlení hřídele z důvodu drsnosti ploch ložiska a valivých členů. Pokud dojde k poško-



Obr. 3.29 Inkrementální snímač pohybu [53].

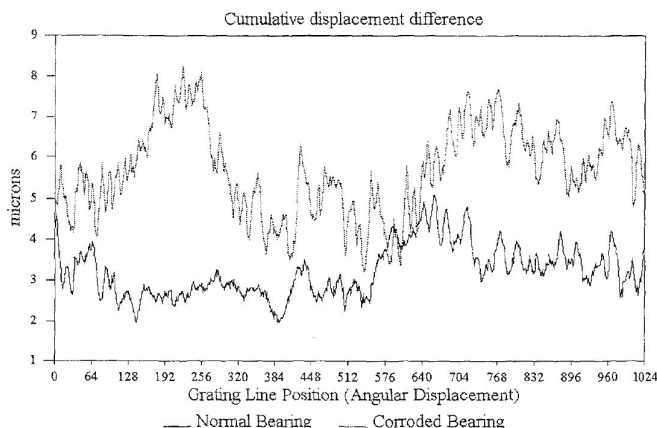
zení ložiska např. spallingem (odlupování částic z důvodu únavy materiálu) dochází zde k ovlivnění signálu zrychlení impulzivní složkou. To je možné detekovat pomocí změny amplitud měřené statistickým parametrem kurtózy (viz obr. 3.30). Jelikož je dobré předcházet vzniku poškození, bylo by vhodné detekovat znečištění maziva případně korozi ložiska. Pro detekci znečištění maziva je využití kurtózy nevhodné, tento problém je možno odhalit pomocí zrychlení, jehož hodnota roste při zvyšujícím se znečištění.



Obr. 3.30 Amplitudy zrychlení pro dva typy poškození [53].

V případě koroze však zrychlení zůstává stejné, jelikož její povrch má náhodný charakter jako u správně fungujícího ložiska. Nicméně koroze zapříčiňuje změnu vůle v ložisku, kterou lze změřit pomocí posunutí. Na obr. 3.31 jsou zobrazeny kumulativní rozdíly posu-

nutí nepoškozeného ložiska a ložiska s korozí. Z grafu lze vyčíst, že pohyb středu ložiska (hřídele) s korozí je větší než u správně fungujícího ložiska – absolutní hodnota posuvu činí přibližně $8\text{ }\mu\text{m}$ oproti $5\text{ }\mu\text{m}$ při správně fungujícím ložisku. [53]



Obr. 3.31 Kumulativní posunutí normálního a zkorodovaného ložiska [53].

3.7.2. Bezkontaktní monitorování teploty kuličkových ložisek

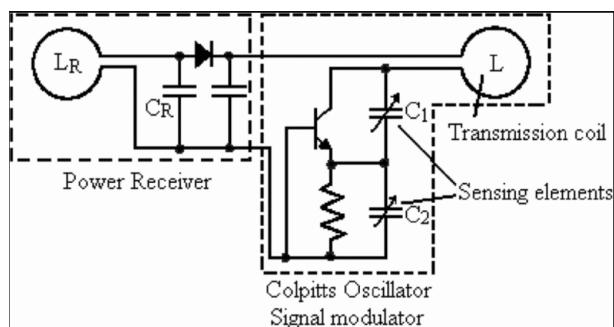
Z důvodů stálé rotace klece je velice problematické vyvinout vhodný aparát pro sledování jejího stavu. Jednou z cest je využití bezdrátového senzoru, kde odpadá problematika přípojných vodičů. J. A. Henao-Sepulved se svými spolupracovníky provedl takový experiment, v rámci kterého se zabýval získáváním údajů teploty, které jsou přenášeny pomocí bezdrátové technologie.

Navrhované řešení je složeno ze dvou kondenzátorů citlivých na teplotu, Colpittsova oscilátoru a antény. Tyto entity jsou upevněny přímo na kleci ložiska viz obr. 3.32. Na obrázku 3.33 je zobrazeno schéma zapojení bezdrátové senzorické části ložiska.



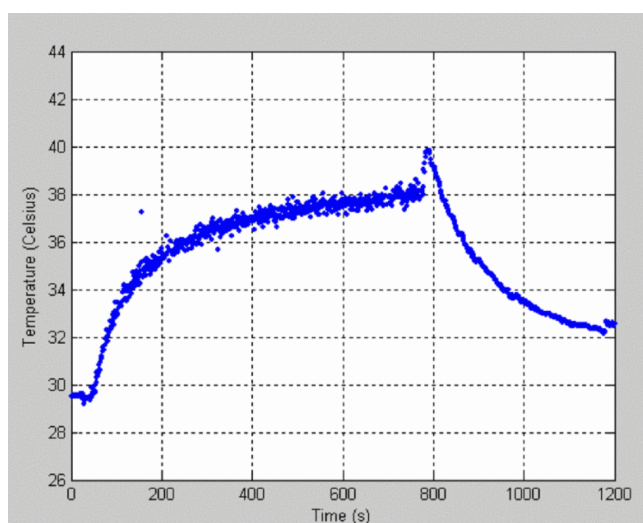
Obr. 3.32 Bezdrátový teplotní senzor [54].

Napájení senzorů je taktéž řešeno bezdrátově a pro přenos využívá vysokofrekvenčního signálu – princip indukce. Výstupní měřená veličina je zaznamenávána jako frekvence kmitání, jejíž velikost je závislá na teplotě. Data jsou přenášena do počítače a následně zpracovávána. Tento koncept byl ověřen v praxi na ložisku, které bylo upevněno za vnější



Obr. 3.33 Schéma zapojení bezdrátového senzoru [54].

kroužek na vřeteno soustruhu. Do vnitřního kroužku ložiska byla vložena hřídel, která byla následně zatěžována. Test byl prováděn při rychlosti 1550 ot./min a dvou velikostech zatížení 11,34 a 20,41 kg. Na obrázku 3.34 je znázorněn průběh testu pro zatížení 20,41 kg.

Obr. 3.34 Průběh teploty klece při zatížení 20,41 kg a dosažení otáček 1550 min⁻¹ [54].

Experiment byl úspěšný, navržené řešení je možné využít pro bezkontaktní přenos dat a napájení senzorů. Výše popsané řešení je také možné modifikovat pro další mechanické entity, kde z různých důvodů (např. konstrukce) není možné užití drátového připojení. [54]

3.7.3. Detekce vad valivých členů pomocí vibrací

Tato část se zabývá způsobem detekce vady v ložisku na základě vibrací. Při styku vadné plochy ložiska s plochou, která je v naprostém pořádku, dojde k rázové síle. Kvůli tomu vznikají vibrace, jež procházejí všemi částmi ložiska. Díky nim je pak možné pomocí analýzy vibrací určit o jakou vadu se jedná. Můžeme detekovat vadu valivých členů, vnitřní nebo vnější oběžné dráhy, či jejich kombinaci – všechny tyto vady mají svou specifickou frekvenci. Tyto frekvence jsou také závislé na konstrukčním řešení ložiska, např. velikosti valivých členů či jejich počtu, a také otáčkách. Ke stanovení těchto frekvencí je možné použít níže popsané rovnice. Z rovnice 3.4 vypočteme poškození valivého členu, 3.5 poškození vnějšího kroužku a z rovnice 3.6 poškození vnitřního kroužku.

$$BSF = n \frac{d_p}{2d_b} \left(1 - \left(\frac{N_b}{d_p} \cos \alpha \right)^2 \right) \quad (3.4)$$

$$BPFO = n \frac{N_b}{2} \left(1 - \frac{N_b}{d_p} \cos \alpha \right) \quad (3.5)$$

$$BPFI = n \frac{N_b}{2} \left(1 + \frac{N_b}{d_p} \cos \alpha \right) \quad (3.6)$$

Popis významu jednotlivých členů v rovnicích:

d_b průměr valivého členu [mm]
 d_p roztečný průměr valivých členů [mm]
 N_b počet valivých těles [-]
 n otáčky hřídele [Hz]
 α kontaktní úhel [°]

Při testování bylo využito ložisek MB ER-12K, která byla staticky zatěžována dvěma různými silami. Pro měření vibrací byly použity dva tenzometry pro každou osu x a y. Měření bylo provedeno pro rychlosti 17, 25, 33 a 41 Hz. Bylo zjištěno, že zmíněné vady generují frekvenční násobky poruchových frekvencí. Dále se došlo k závěru, že velikost amplitudy poškození oběžné dráhy vnějšího kroužku vykazovala nižší hodnoty z důvodu přechodu signálu přes všechny části ložiska až k tenzometrům. Dále je též známo, že v některých případech není úplně jednoduché identifikovat některé frekvence, jelikož mohou být z různých důvodů utlumovány (např. mazací film), nebo může dojít ke shodě s rezonanční frekvencí ložiska. Pro detekci poškození valivého členu potřebujeme více otáček, jelikož nemusí vždy docházet ke kontaktu s poškozenou částí. [55]

4. Diskuze

Význam monitorování funkce a stavu u chytrého ložiska zásadně mění situaci z hlediska provozu a údržby. Zejména je umožněno předcházet nepříjemným haváriím a výpadkům výroby. Jelikož je možné sledování jeho vnitřních stavů pomocí senzorů umístěných uvnitř ložiska v reálném čase. To ve srovnání s minulostí představuje velký pokrok. Pro praktickou realizaci je využitý kyber-fyzický systém, který je schematicky zobrazen na obr. 4.1. Ten se skládá z fyzické a kybernetické části.

Fyzická část v obecném pojetí reprezentuje stroj či dokonce celou firmu, jejíž chování chceme na základě získaných dat z různých senzorů ovlivňovat. Pro zjednodušení celého problému bude uvažováno pouze jedno ložisko, které má v sobě implementovány senzory. K dnešnímu dni jsou tyto senzory schopny měřit teplotu, rychlost a směr otáčení a posunutí (zatížení). Existují i chytré snímače či inteligentní pouzdra, které mají zabudovány například i akcelerometry. Díky nim jsou schopny na základě vibrací určit konkrétní poškození ložiska (např. poškození klece). Jelikož se nejedná o inteligentní ložisko jako takové, nejsou nadále inteligentní pouzdra a chytré snímače zvažovány.

Senzorická část ložiska je složena ze senzoru, zesilovače pro zesílení signálu, filtru pro úpravu signálu a A/D převodníku pro převedení analogového signálu na digitální. Pokud je nutný bezdrátový přenos dat, lze tyto části případně ještě doplnit o komunikační modul. V současné době je však nabízeno pouze drátové připojení. Tato část reprezentuje I. úroveň 5C architektury.

V tento okamžik dochází k přenosu dat pomocí sběrnice (např. CAN, UART) do průmyslového počítače opatřeného bránou gateway. Tato část slouží k předzpracování dat – jednodušší matematické operace, jako je kumulace či extrapolace dat. Náročnější operace a analýzy jsou prováděny na Cloudu, kde jsou data shlukována do tzv. Big data, která potřebují vyšší výpočetní výkon pro zpracování. Díky bráně gateway máme možnost propojení senzorů využívajících odlišné rozhraní (USB, Wi-Fi), což je nezbytné při využití chytrých snímačů, které jsou v převážné většině bezdrátové. Brána gateway společně s průmyslovým počítačem reprezentuje II. úroveň. Od tohoto bodu jsou veškeré operace prováděny na Cloudu, kam jsou data přenášena pomocí technologií IoT.

Na III. vrstvě dochází ke shromažďování dat ze všech komponent stroje a za použití matematických aparátů dochází k dopočítání nových podrobnějších informací. Na této úrovni také dochází k vytváření virtuálních dvojčat.

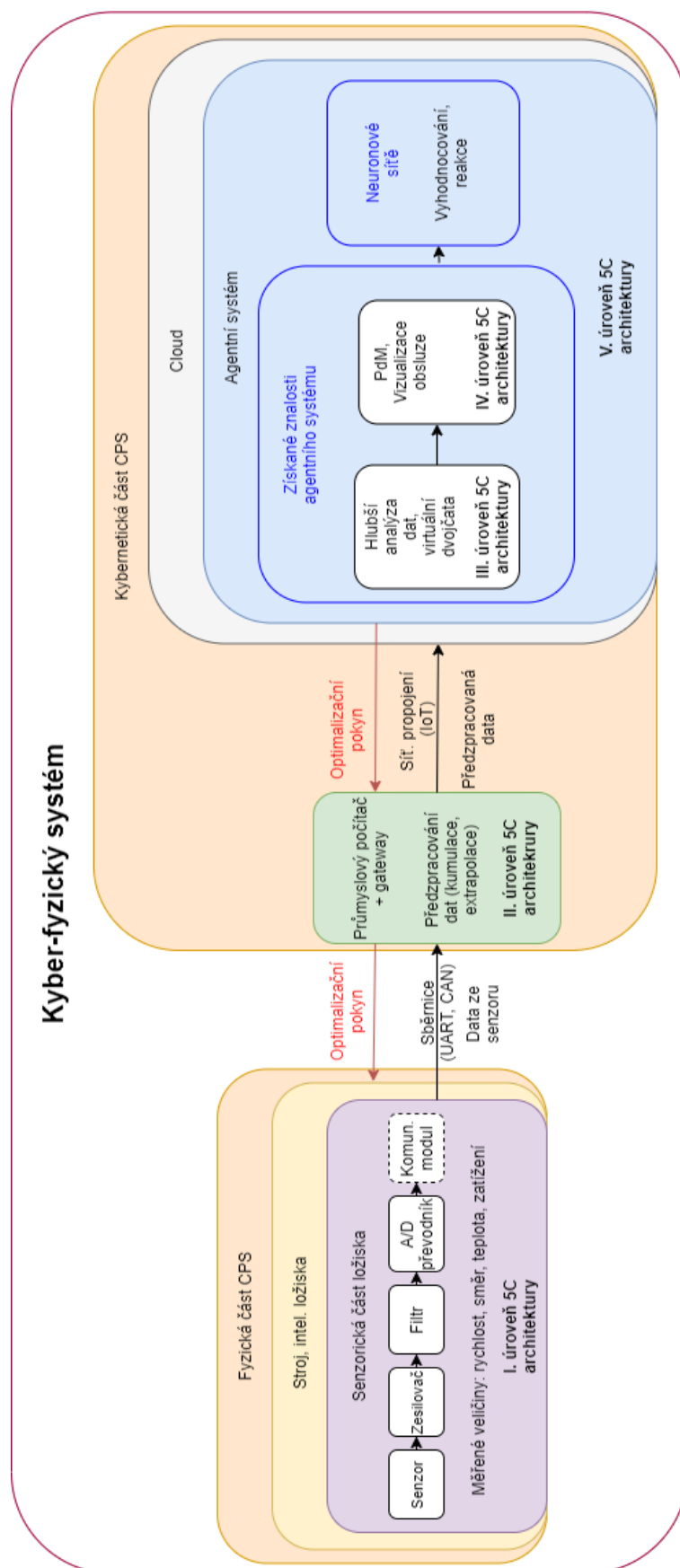
Na IV. vrstvě se zpracovávají údaje z předchozí vrstvy pomocí sofistikovaných algoritmů a statistických nástrojů. Následně jsou tyto informace přehledně zobrazeny např. ve formách tabulek či grafů. Jedná se v podstatě o prediktivní údržbu (PdM), na jejíž základě provádí odborný pracovník případné zásahy. Poslední V. úroveň tvoří agentní systém, který se stará o samooptimalizaci zařízení. Dochází tedy pomocí „zpětné vazby“ z kybernetické části k ovlivnění chování stroje, fyzické části.

Agentní systémy mají přístup do II. až IV. úrovně. Díky tomu mají přístup nejen k informacím o aktuální kondici zařízení, ale i o jeho historii. Jedná se tedy o znalosti, na jejichž základě s přispěním neuronových sítí dochází k vyhodnocení situace a navržení příslušné reakce (např. snížení otáček). Tento příkaz je následně pomocí IoT zaslán zpět do průmyslového počítače, který pomocí aktuátoru tento příkaz provede. Jedná se o poslední, V. úroveň kyber-fyzického systému. [56] [57]

V současné době z důvodu špatné strategie údržby může dojít k poklesu výroby až o 20 %. S tím souvisí i neplánovaný servis, díky kterému dochází ke vzniku prostojů,

které v globálním měřítku dle studií mohou dosahovat ztráty přibližně až 1 billion korun. Tyto poznatky přispěly k tomu, že se výrobci snaží nalézt kompromis mezi dlouhou životností komponenty a omezení prostojů. V rámci preventivní údržby je součást vyměněna v předem stanoveném intervalu, avšak může docházet k výměně stále dobré součásti a tím vzniknu finančních ztrát. Nicméně s využitím prediktivní údržby (PdM) je možné oba tyto aspekty dodržet – dlouhá životnost součásti, minimální prostoje. K tomu je zapotřebí zavedení nových technologií souvisejících s Industry 4.0, jako je především technologie IoT, CPS, chytré snímače a inteligentní ložiska. Tyto technologie tak umožňují monitorování zařízení v reálném čase a díky různým senzorům a jejich vhodnému umístění k získu přesnějších dat. Ta jsou následně pomocí analytických aparátů vyhodnocena a může tak docházet k předpovědi stavu komponent. Ty se díky přispění strojového učení mohou do budoucna ještě zpřesnit. Nespornými výhodami PdM je snížení doby plánované údržby až o 50 %, prodloužení chodu stroje až o 20 % a snížení výdajů spojených s prováděnou údržbou až o 10 %. [58] [59]

Stále zvyšující se poptávka po ložiscích a snaha o zlepšení jeho vlastností a možnosti delšího provozuschopného stavu je hlavním impulzem pro rozvoj inteligentních ložisek. Dle zveřejněné studie společnosti Reports and Data je očekáváno, že do roku 2026 dojde k nárůstu na celosvětovém trhu s inteligentními ložisky ze 3 na přibližnou hodnotu 4,6 billionů korun. Tento trend je způsobený obzvláště díky automobilovému a dopravnímu průmyslu, kde jsou kladeny stále větší požadavky na bezpečnost a snižování zátěže životního prostředí. Mezi regiony, které velkou měrou přispívají k rozvoji v oblasti inteligentních ložisek jsou především Čína, Jižní Korea a Japonsko, jež patří k velkým producentům motorových vozidel. Jeden z prvních pokusů o nasazení inteligentních ložisek byl v systémech ABS, které k dnešnímu dni tvoří přibližně 42 % podílu na trhu s chytrými ložisky. V dnešní době se tyto inteligentní ložiska využívají i v jiných sektorech jako je logistika, vlaková a letecká doprava, elektromotory či větrné elektrárny. S příchodem Industry 4.0, které podporuje digitalizaci procesů, bude docházet k integraci i do jiných entit. Je však vhodné zmínit, že inteligentní ložisko není v současné době běžně užívanou částí, a to zejména díky jeho ceně a omezenosti senzorové části, která se převážně užívá pouze pro detekci rychlosti a směru otáčení. Jeho implementace je vhodná do těch částí, kde je kladen důraz na velikost celkového zařízení a jeho hmotnost, což by se však do budoucna mělo změnit. Do roku 2026 je také předpokládáno, že bude možno detekovat rychlost, vibrace, teplotu, posunutí a případně i další fyzikální veličiny, pro které budou senzory implementovány v ložisku. Na trh jsou také uváděny tzv. chytré senzory, jež mohou monitorovat provozní stav ložiska nezávisle na jeho poloze. [60] [61]



Obr. 4.1 Aplikace ložiska jako kyber-fyzického systému.

5. Závěr

Bakalářská práce shrnuje současný stav v oblasti chytrých valivých ložisek. Předkládá přehled komerčních řešení ložisek hlavních lídrů této oblasti. Práce je taktéž podložena patentovými řešeními a vědeckými studiemi. Ty popisují způsob monitorování provozních podmínek v ložisku.

Kyber-fyzický systém se skládá ze dvou částí fyzické a kybyernetické a slouží k propojení reálného světa s tím virtuálním. Jedná se o autonomní prvek schopný se samostatně rozhodovat a spolupracovat s ostatními CPS. Jeho autonomnost je zprostředkována díky agentním systémům, což jsou softwarové programy.

Tento kyber-fyzický systém je navržen dle 5C architektury sestávající se z 5 úrovní: úroveň chytrého připojení, úroveň převodu dat na informace, kybernetická úroveň, kognitivní a konfigurační úroveň. Je také vhodné zmínit, že tato problematika je v počátečním stádiu vývoje a chápání totožných pojmů ve vědecké sféře a v praxi se zatím jednoznačně neprotlo.

Je zde uveden přehled jednotlivých technických řešení firem SKF, Schaffler a NTN. Z tohoto přehledu je patrné, že jsme ještě v ranném stádiu vývoje a nejsme schopni monitorovat některé z veličin za předpokladu inteligentního ložiska jako takového – s integrovanými senzory uvnitř ložiska. Současné možnosti monitorování v oblasti chytrých ložisek jsou takové, že jsou schopny měřit úhlovou rychlost, směr otáčení, teplotu a zatížení. V případě užití akcelerometrů je z určitých frekvencí možné odvození konkrétní poruchy na monitorovaném ložisku.

Práce je taktéž podložena patentovými řešeními a vědeckými studiemi. Ty popisují způsob monitorování provozních podmínek v ložisku. Taktéž se dá usuzovat, že některá patentová řešení budou v blízké budoucnosti prakticky zrealizována. Nicméně bude nutno vyřešit spoustu technických a konstrukčních otázek od vhodného zvolení senzorů a datové infrastruktury, až po soběstačné napájení.

V rámci dalšího rozvoje této práce by bylo možné ji rozšířit o způsoby získávání elektrické energie (Energy Harvesting), aby se mohlo ložisko stát energeticky soběstačné. Dále považuji za vhodné rozšířit tuto práci o problematiku velkých dat označovaných jako Big data a nástrojů pro jejich zpracování, jako je např. Apache Hadoop.

6. Seznam použitých zdrojů

- [1] LAWSON, John, 2020. What is a smart bearing? Engineerlive [online]. United Kingdom: Setform Limited [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.engineerlive.com/content/what-smart-bearing>.
- [2] FAG VarioSense Bearing, 2017. In: Schaeffler.com [online]. Germany: Schaeffler [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: http://wwwwdata.unibg.it/dati/corsi/39004/84919-08_VarioSense_Customer%20Presentation.pdf.
- [3] CHEN, Hong, 2017. Applications of Cyber-Physical System: A Literature Review. Journal of Industrial Integration and Management [online]. 02(03), 1-28 [cit. 2020-06-18]. DOI: 10.1142/S2424862217500129. ISSN 2424-8622. Dostupné z: <https://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S2424862217500129>.
- [4] HORVÁTH, Imre, 2012. Cyber-physical systems: Concepts, technologies and implementation principles. Germany: Delft University of Technology, 19-36. ISBN 978-90-5155-082-5.
- [5] A Survey on Concepts, Applications, and Challenges in Cyber-Physical Systems, 2014. KSII Transactions on Internet and Information Systems [online]. 8(12), 1-26 [cit. 2020-06-18]. DOI: 10.3837/tiis.2014.12.001. ISSN 19767277. Dostupné z: <http://www.itiis.org/digital-library/manuscript/894>.
- [6] Kyberfyzikální systémy, 2016. In: Iot-portal.cz [online]. Iot-portal [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.iot-portal.cz/2016/08/22/kyberfyzikalni-systemy/>.
- [7] Hello Industrie 4.0, [2014]. In: Kuka.com [online]. Germany: KUKA [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.kuka.com/-/media/kuka-corporate/documents/press/industry-4-0-glossary.pdf>.
- [8] GILL, Hellen, 2008. From Vision to Reality: Cyber-Physical Systems. In: Labs.ece.uw.edu [online]. National Science Foundation [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: https://labs.ece.uw.edu/nsl/aar-cps/Gill_HCSS_Transportation_Cyber-Physical_Systems_2008.pdf.
- [9] LEE, Edward A., 2008. Cyber Physical Systems: Design Challenges. In: 2008 11th IEEE International Symposium on Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC) [online]. Berkeley: IEEE, 2008, s. 363-369 [cit. 2020-06-18]. DOI: 10.1109/ISORC.2008.25. ISBN 978-0-7695-3132-8. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4519604/>.
- [10] Cyber Physical Systems: Design Challenges, 2008. 11. USA: IEEE. ISBN 978-0-7695-3132-8.
- [11] RAJKUMAR, Ragunathan (Raj), Insup LEE, Lui SHA a John STANKOVIC, 2010. Cyber-physical systems. In: Proceedings of the 47th Design Automation Conference on - DAC '10 [online]. New York, New York, USA: ACM Press, 2010, s. 731- [cit. 2020-06-18]. DOI: 10.1145/1837274.1837461. ISBN 9781450300025. ISSN 0738-100X. Dostupné z: <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=1837274.1837461>.

- [12] LEE, Edward, 2015. The Past, Present and Future of Cyber-Physical Systems: A Focus on Models. *Sensors* [online]. 15(3), 4837-4869 [cit. 2020-06-18]. DOI: 10.3390/s150304837. ISSN 1424-8220. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1424-8220/15/3/4837>.
- [13] VIJAYARAGHAVAN, Athulan, 2008. IMPROVING MACHINE TOOL INTEROPERABILITY USING STANDARDIZED INTERFACE PROTOCOLS: MTCONNECTTM. In: Escholarship.org [online]. USA: MTConnect [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://escholarship.org/uc/item/4zs976kx>.
- [14] LEE, Jay, Behrad BAGHERI a Hung-An KAO, 2015. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters* [online]. 3, 18-23 [cit. 2020-06-18]. DOI: 10.1016/j.mfglet.2014.12.001. ISSN 22138463. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S221384631400025X>.
- [15] LEITÃO, Paulo, 2009. Agent-based distributed manufacturing control: A state-of-the-art survey. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* [online]. 22(7), 979-991 [cit. 2020-06-18]. DOI: 10.1016/j.engappai.2008.09.005. ISSN 09521976. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0952197608001437>.
- [16] VOLNÁ, PHD., doc. RNDr. PaedDr. Eva, 2013. UMĚLÁ INTELIGENCE. 1. Ostrava, 1-138. Dostupné také z: https://www1.osu.cz/~volna/Umela_intelligence_skripta.pdf.
- [17] Multiagentní systémy (MAS). In: Mendelu.cz [online]. Brno: Mendlova univerzita [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz_cast.pl?cast=32363.
- [18] BARTOŠÍK, Petr, [2005]. Konference HoloMAS 2005 – holonické a multiagentní systémy. *Automa* [online]. 2005(2), [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: https://automa.cz/cz/casopis-clanky/konference-holomas-2005-holonicke-a-multiagentni-i-systemy-2005_02_30330_3055/.
- [19] VAN BRUSSEL, Hendrik, Jo WYNS, Paul VALCKENAERS, Luc BONGAERTS a Patrick PEETERS, 1998. Reference architecture for holonic manufacturing systems: PROSA. *Computers in Industry* [online]. 37(3), 255-274 [cit. 2020-06-18]. DOI: 10.1016/S0166-3615(98)00102-X. ISSN 01663615. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S016636159800102X>.
- [20] Holonické systémy. In: Vendulka.zcu.cz [online]. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://vendulka.zcu.cz/Download/Free/IRS2/01/Holonicke%20systemy.pdf>.
- [21] Digitální dvojčata: Technologický trend pro nejbližší budoucnost, ©2020. In: Csas.cz [online]. Praha: Česká spořitelna [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.csas.cz/cs/korporace/articles/digitalni-dvojcata>.
- [22] Co je digitální dvojče a proč je užitečné, 2019. Aiworld [online]. Praha: Internet Info DG, 2.2.2019 [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: <https://aiworld.cz/digitalizace/co-je-digitalni-dvojce-a-proc-je-uzitecne-232>.

- [23] LEWIS, Karel, 2017. Digital Twin with Watson IoT. In: IBM.com [online]. USA: IBM [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: <https://www.ibm.com/blogs/internet-of-things/digital-twin-watson-iot/>.
- [24] REIS, Jacqueline Zonichenn a Rodrigo Franco GONCALVES, 2018. The Role of Internet of Services (IoS) on Industry 4.0 Through the Service Oriented Architecture (SOA). MOON, Ilkyeong, Gyu M. LEE, Jinwoo PARK, Dimitris KIRITSIS a Gregor VON CIEMINSKI, ed. Advances in Production Management Systems. Smart Manufacturing for Industry 4.0 [online]. 1. Cham: Springer International Publishing, 2018-08-25, s. 20-26 [cit. 2020-06-21]. IFIP Advances in Information and Communication Technology. DOI: 10.1007/978-3-319-99707-0_3. ISBN 978-3-319-99706-3. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-99707-0_3.
- [25] TRAN, PARK, NGUYEN a HOANG, 2019. Development of a Smart Cyber-Physical Manufacturing System in the Industry 4.0 Context. Applied Sciences [online]. 9(16), 25 [cit. 2020-06-17]. DOI: 10.3390/app9163325. ISSN 2076-3417. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/16/3325>.
- [26] ISmart Bearing Solutions, 2017. In: Schaeffler.com [online]. Deutschland: Schaeffler [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://file.vogel.com.cn/2017/11/08/5a02c6374d8c7.pdf>.
- [27] Ložiskové jednotky se snímači Elektronické ovládací moduly steer-by-wire Jednotky pro řízení výšky zdvihu rámu, [2016]. In: Skf.com [online]. [Praha]: SKF [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/13524614-Loziskove-jednotky-se-snimaci-957-elektronicke-ovladaci-moduly-steer-by-wire-967-jednotky-pro-rizeni-vysky-zdvihu-ramu.html>.
- [28] FAG SmartCheck, 2017. In: Schaeffler.com [online]. Germany: Schaeffler [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: https://www.schaeffler.com/remotemedien/media/_share_d_media/08_media_library/01_publications/schaeffler_2/tpi/downloads_8/tpi_214_de_en.pdf.
- [29] The FAG SmartCheck on the path towards Industrie 4.0. In: Pressebox.com [online]. Karlsruhe: UNITED NEWS NETWORK [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: <https://www.pressebox.com/pressrelease/schaeffler-ag/The-FAG-SmartCheck-on-the-path-towards-Industrie-4-0/boxid/697201>.
- [30] VOJÁČEK, Antonín, 2015. Měření vibrací pro diagnostiku opotřebení strojů. Automatizace.hw.cz [online]. Praha: HW server [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/mereni-vibraci-pro-diagnostiku-opotrebeni-stroju.html>.
- [31] ZUTH, PH.D., Ing. Daniel a Ing. František VOLEČEK, CSC., 2010. Měření vibrací ve vibrodiagnostice. Automa [online]. 2010(01), 1-5 [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: https://automa.cz/cz/casopis-clanky/mereni-vibraci-ve-vibrodiagnostice-2010_01_40375_5744/.
- [32] KREIDL, Marcel a Radislav ŠMÍD, 2006. Technická diagnostika: senzory, metody, analýza signálu. Praha: BEN - technická literatura. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-7300-158-6.

- [33] Analýza údajov a kriviek, ©2009. In: Leteckafakulta.sk [online]. Slovensko: Katedra leteckej technickej prípravy (KLTP) [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: <http://www.senzorika.leteckafakulta.sk/?q=node/146>.
- [34] Piston pump unit Product series KFG, 2019. In: Skf.com [online]. Germany: SKF [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: <https://www.skf.com/binary/31-32814/1-3030-EN.pdf>.
- [35] Lubricators FAG CONCEPT2-1P-24VDC and FAG CONCEPT2-2P-24VDC User manual, 2016. In: Schaeffler.com [online]. Germany: Schaeffler Technologies [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: https://www.schaeffler.com/remotemedien/media/_shared_media/08_media_library/01_publications/schaeffler_2/manualmountingoperation/downloads_7/ba_40_de_en.pdf.
- [36] Fiber sensor assembly. United States. US9546690B2. Uděleno 2017.
- [37] GENUCHTEN, Eric van, 2017. Fiber optical sensing. In: Mid-nl.org [online]. Sweden: SKF [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.mid-nl.org/sites/default/files/2017-09/MID%2019.04.2017%20SKF%20Eric%20van%20Genuchten.pdf>.
- [38] AGLIULLIN, T. A., I. U. KURBIEV, R. R. GUBAIDULLIN, O. G. MOROZOV a V. IVANOV, 2019. Load Sensing Bearings for Automotive Applications Based on Addressed Fiber Bragg Structures. 1. Russia: IEEE. ISBN 978-1-7281-3238-9. Dostupné také z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8814178/>.
- [39] Distributed Fibre Sensing Using Fibre Bragg Gratings [online], ©2020. France: EPFL [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: <https://www.epfl.ch/labs/gfo/page-60916-en-html/page-61501-en-html/distributed-fibre-sensing-using-fibre-bragg-gratings/>.
- [40] What is a Fiber Bragg Grating? [online]. Germany: HBM [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: <https://www.hbm.com/en/4596/what-is-a-fiber-bragg-grating/>.
- [41] GENUCHTEN, Eric van, [2017]. Fiber optical sensing. In: Mid-nl [online]. [Sweden]: SKF [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: <https://www.mid-nl.org/sites/default/files/2017-09/MID%2019.04.2017%20SKF%20Eric%20van%20Genuchten.pdf>.
- [42] SKF And Siemens To Improve Rail Reliability, 2018. IE Industry Europe [online]. 2018, [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://industryeurope.com/skf-and-siemens-to-improve-rail-reliability/>.
- [43] Fast, simple machine health monitoring, [2020]. In: SKF [online]. Sweden: SKF [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: https://au.promo.skf.com/acton/media/23423/quickcollect-enlight-procollect-machine-health?utm_source=aus_rephub&utm_medium=internal_link&utm_campaign=aus_qcpc&utm_term=detect_find_out_more&utm_content=internal_link.
- [44] The integrated sensor solution, 2004. In: Skf.com [online]. Sweden: SKF Evolution [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://evolution.skf.com/smart-housing-the-integrated-sensor-solution/>.
- [45] ABB Ability™ Smart Sensor checks condition of bearings [online], 2019. SWITZERLAND: ABB [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: <https://new.abb.com/news/detail/14868/abb-ability-smart-sensor-for-mounted-bearings>.

- [46] Bearing or roller bearing with data sensor. United States. US4732494A. Uděleno 1988.
- [47] Integrated rotation sensor bearings, 2017. In: Ntn-snr.com [online]. France: NTN-SNR ROULEMENTS [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: https://www.ntn-snr.com/sites/default/files/2017-03/en_integrated_rotation_sensor_bearings.pdf.
- [48] Bearing having a sensor incorporated in a bearing seal and a circumferential sensor cable extending through and along the side of the bearing seal. United States. US5594334A. Uděleno 1997.
- [49] Bearing with sensor and its manufacturing method. Japan. JP2009191898A. Uděleno 2008.
- [50] Bearing cage with antenna and method for detecting failure of a bearing cage. United States. US9989097B2. Uděleno 2018.
- [51] Measurement device for measuring radial and/or axial forces. United States. US692-0801B2. Uděleno 2005.
- [52] Rolling bearing with a sensor unit. Výsledky hledání Výsledky vyhledávání na webu United States. US5140849A. Uděleno 1992.
- [53] AYANDOKUN, K., P.A. ORTON, N. SHERKAT a P.D. THOMAS, 1997. Smart bearings: developing a new technique for the condition monitoring of rotating machinery. In: Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Engineering Systems [online]. Hungary: IEEE, s. 505-510 [cit. 2020-06-17]. DOI: 10.1109/INES.1-997.632469. ISBN 0-7803-3627-5. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/632469/>.
- [54] HENAO-SEPULVEDA, J.A., M. TOLEDO-QUINONES a Y. JIA, 2005. Contactless Monitoring of Ball Bearing Temperature. In: 2005 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings [online]. Ottawa: IEEE, s. 1571-1573 [cit. 2020-06-17]. DOI: 10.1109/IMTC.2005.1604416. ISBN 0-7803-8879-8. ISSN 1091-5281. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1604416/>.
- [55] SARUHAN, H., S. SANDEMIR, A. ÇIÇEK a I. UYGUR, 2014. Vibration Analysis of Rolling Element Bearings Defects. Journal of Applied Research and Technology [online]. 12(3), 384-395 [cit. 2020-06-18]. DOI: 10.1016/S1665-6423(14)71620-7. ISSN 16656423. Dostupné z: <http://www.jart.icat.unam.mx/index.php/jart/article/view/201>.
- [56] Bearings Market Size Worth \$186.1 Billion By 2025 CAGR: 9.1%, 2019. In: Grandviewresearch.com [online]. United States: Grand View Research [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: <https://www.grandviewresearch.com/press-release/global-bearings-market>.
- [57] Bearings Market, 2016. In: Gminsights.com [online]. USA: Global Market Insights [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: <https://www.gminsights.com/industry-analysis/bearings-market-report>.

- [58] Predictive maintenance and the smart factory, 2017. In: Deloitte.com [online]. United Kingdom: Deloitte [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/us/Documents/process-and-operations/us-cons-predictive-maintenance.pdf>.
- [59] Do your bearings need a check-up?, 2020. In: Smbbearings.com [online]. United Kingdom: SMB bearings [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: <https://www.smbbearings.com/smart-bearings-aid-predictive-maintenance>.
- [60] Sensor Bearing Market To Reach USD 8.22 Billion By 2026 | Reports And Data, 2019. In: Globenewswire.com [online]. New York: GlobeNewswire [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: <https://www.globenewswire.com/news-release/2019/08/13/1901217/0/en/Sensor-Bearing-Market-To-Reach-USD-8-22-Billion-By-2026-Reports-And-Data.html>.
- [61] Bearing Market, [2019]. In: Transparencymarketresearch.com [online]. India: Transparency market research [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: <https://www.transparencymarketresearch.com/bearing-market.html>.

7. Seznam použitých zkratk a symbolů

<i>IoT</i>	Internet věcí
<i>PdM</i>	Prediktivní údržba
<i>CPS</i>	Kyber-fyzický systém
<i>P2P</i>	Peer-two-peer
<i>IoS</i>	Internet služeb
<i>M2M</i>	Machine-two-machine
<i>ABS</i>	Protiblokovací systém kol
<i>PLC</i>	Programovatelný logický automat
<i>SCM</i>	Systém řízení dodavatelského řetězce
<i>MES</i>	Výrobní informační systém
<i>RCS</i>	Systém řízení odolnosti
<i>IT</i>	Informační technologie
<i>WSN</i>	Bezdrátová senzorová síť
<i>OS</i>	Operační systém
<i>MEMS</i>	Mikro-elektromechanický systém
<i>TCP/IP</i>	Primární přenosový protokol/protokol síťové vrstvy
<i>LAN</i>	Lokální síť
<i>A/D</i>	Analogově digitální převodník
<i>USART</i>	Synchronní / asynchronní sériové rozhraní
<i>SPI</i>	Sériové periferní rozhraní
<i>GPI</i>	Univerzální vstup / výstup
<i>PC</i>	Osobní počítač
<i>FBG</i>	Technologie založena na Braggově mřížce
<i>GPS</i>	Globální družicový polohový systém
<i>G</i>	Tíhové zrychlení
<i>Wi – Fi</i>	Wireless Fidelity
<i>RFID</i>	Radiofrekvenční identifikace
<i>IME</i>	Inkrementální snímač pohybu
<i>obracenA</i>	Perioda mřížky
<i>BSF</i>	Poškození valivého členu
<i>BPFO</i>	Poškození vnějšího kroužku
<i>BPMI</i>	Poškození vnitřního kroužku
X_r	Rozkmit
T	Perioda
X_s	Střední hodnota
X_{ef}	Efektivní hodnota
X_v	Výkmit
K_t	Parametr
K	Porucha
d	[μm] Posunutí středu
θ	[rad/s] Úhlový rozdíl mezi senzory
L	[mm] Roztečná vzdálenost mezi senzory

Δt	[s]	Časový rozdíl
d_b	[mm]	Průměr valivého členu
d_p	[mm]	Rozrečný průměr valivých členů
N_b	[-]	Počet valivých těles
n	[Hz]	Otáčky hřídele
α	[°]	Kontaktní úhel
n_{eff}	[-]	Efektivní index lomu mřížky
λ_b	[m]	Odražená vlnová délka (Braggova)
Λ	[s]	Perioda mřížky
$a_{r(0)}$	[m/s ²]	Rozkmit zrychlení nového ložiska
$a_{ref(0)}$	[m/s ²]	Efektivní hodnota zrychlení nového ložiska
$a_r(t)$	[m/s ²]	Rozkmit zrychlení v čase t
$a_{ref(t)}$	[m/s ²]	Efektivní hodnota zrychlení v čase t
T_a	[°C]	Teplota prvního čidla
T_b	[°C]	Teplota druhého čidla

8. Seznam obrázků a grafů

1.1	Inteligentní ložisko [2].	3
3.1	Struktura CPS [4].	5
3.2	Vrstvy 5C architektury [14].	7
3.3	Popis holonu [20].	10
3.4	Nový model CPS [4].	10
3.5	Schématické znázornění inteligentní výroby [25].	13
3.6	Smart EcoSystem [26].	14
3.7	Struktura chytrého ložiska [26].	16
3.8	Činnost encoderu [27].	16
3.9	Praktické použití snímače posunutí [2].	17
3.10	SmartCheck monitorovací systém [29].	18
3.11	Parametry pro vyhodnocení časového průběhu [31].	18
3.12	Frekvenční spektrum [33].	19
3.13	Automatický mazací systém FAG Concept2 [35].	20
3.14	Konstrukce ložiska se sensorovou částí [27].	21
3.15	Ložisko s optickým senzorem SKF [37].	21
3.16	Část optického vlákna s Braggovou mřížkou [39]	22
3.17	Stanovení jednotlivých fyzikálních veličin [41].	23
3.18	Použití snímače na železničním vozidle [42].	23
3.19	SKF QuickCollect Sensor [43].	24
3.20	Inteligentní pouzdro [44].	25
3.21	ABB Ability Smart senzor umístěný v přírubě [45].	25
3.22	Řez ložiskem NTN [47].	26
3.23	Koncept ložiska se senzorem od firmy Timken [48].	29
3.24	Koncept chytrého ložiska navržený firmou NSK [49].	30
3.25	Koncept chytrého ložiska SKF [50].	31
3.26	Měřicí zařízení a použití na ložisku [51].	32
3.27	Rozmístění tenzometrů včetně můstkového zapojení [52].	32
3.28	Řez Ložiskem [52].	33
3.29	Inkrementální snímač pohybu [53].	34
3.30	Amplitudy zrychlení pro dva typy poškození [53].	34
3.31	Kumulativní posunutí normálního a zkorodovaného ložiska [53].	35
3.32	Bezdrátový teplotní senzor [54].	35
3.33	Schéma zapojení bezdrátového senzoru [54].	36
3.34	Průběh teploty klece při zatížení 20,41 kg a dosažení otáček 1550 min^{-1} [54].	36
4.1	Aplikace ložiska jako kyber-fyzického systému.	40

9. Seznam tabulek

3.1	Možné konfigurace ložiska	15
3.2	Nabízené varianty ložiska se senzorovou částí.	26
3.3	Přehled chytrých ložisek a snímačů	28